

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

摄影与物理

 **eBOOK**
内网资料 非卖品

内容提要

本书是一本运用物理知识来揭示摄影奥秘的科普读物。本书分“镜头前的物理现象”、“镜头里的物理知识”和“各类相机构造及成像原理”等几部分。书中对与相机成像的有关物理问题，用浅显的语言和明确的图示进行了系统的论述，并且详尽地介绍了各类镜头、镜筒、取景器、滤光镜和放大机的性能特点。本书对专业摄影工作者及广大摄影爱好者充分利用现有器材与选购新器材都有重要参考价值。

序

《摄影与物理》一书，是中国新闻摄影学会学术委员、中国摄影家协会会员王体先，继《摄影与化学》一书后，与沈阳师范学院物理系教授朱兰魁、王国玺共同编著的又一部摄影科普读物。

该书 20 多万字。分镜头前的物理现象；镜头里的物理知识；各类相机的成像原理等几个部分。这是一本很好的摄影科普读物。它对我们从事摄影事业和摄影教学的同志，均有重要的参考价值。

希望广大摄影爱好者和专业摄影工作者，借助这本书来提高自己的摄影物理知识和摄影水平。为发展和繁荣我国的摄影事业做出贡献。

中国新闻摄影学会常务副会长兼秘书长
胡 颖

1996 年 8 月 1 日于北京

前 言

摄影是门技术，也是一门科学。它与物理密切相关，《摄影与物理》一书就是运用物理知识来揭示摄影奥秘的一本科普读物。

目前，摄影技术发展很快，不仅应用于人民生活，而且已广泛运用于科研、教学、军事及国民经济的各个领域。从参与的人数来看，专业和业余摄影队伍都在日益发展壮大，人们对普及与提高摄影理论知识的要求日益迫切。为满足摄影同行们的需要，我们结合自己多年摄影工作的实践和所学的物理知识，编著了这本书，供广大摄影工作者和爱好者参考使用，为共同发展和繁荣我国的摄影事业而奋斗。

本书分“镜头前的物理现象”；“镜头里的物理知识”；“各类相机构造及成像原理”等几个部分，它不仅涉及到光学、热学、电磁学、力学等物理学科，而且还涉及到机械学等其它学科。本书编写过程中，承蒙中国摄影家协会、中国新闻摄影学会沈阳军区军事摄影协会、辽宁摄影家协会、北京大学、辽宁大学及沈阳师范学院物理系的教授、专家大力帮助和支援，我们才得以顺利完成本书。为此，我们向他们表示衷心地谢意！我们虽然都是60年代初毕业的大学生，又从事三十多年的摄影与教学工作，但由于摄影技术的飞速发展，尽管我们查阅了大量的新资料，并求教了很多专家、教授，但编写起来还是总感到力不从心。如有不完善之处，欢迎各位摄影界的前辈、老师和同行们多加指正。

作者：王体先 朱兰魁 王国玺

1994年8月1日写于沈阳市

目 录

| | |
|----------------------------------|-------|
| 第一章 镜头前的物理现象..... | (1) |
| 第一节 为什么通过镜头能看到自然界的 人和物? | (1) |
| 第二节 为什么镜头前的世界是五颜六色的? | (3) |
| 第三节 光与影在摄影中有什么作用? | (13) |
| 第二章 摄影中必须掌握的物理知识 | (52) |
| 第一节 摄影镜头成像中涉及到哪些基本 概念? | (52) |
| 第二节 什么叫透镜? | (63) |
| 第三节 理想光具组成像有什么规律? | (76) |
| 第四节 联合光具组成像有什么规律? | (97) |
| 第五节 什么叫摄影镜头的光阑? | (129) |
| 第六节 什么叫摄影镜头的景深? | (149) |
| 第七节 摄影镜头的光学特性有哪些? | (163) |
| 第三章 摄影中的像差 | (201) |
| 第一节 单色像差有几种? | (201) |
| 第二节 什么叫色差?如何消除? | (213) |
| 第三节 光学系统中一些典型部件像差情况 如何? | (228) |
| 第四节 初级像差公式如何? | (233) |
| 第五节 摄影镜头的设计原则是什么? | (238) |
| 第四章 镜头里的物理知识..... | (246) |
| 第一节 照相机的概况如何? | (246) |
| 第二节 摄影镜头的概况如何? | (249) |
| 第三节 标准镜头有什么特点? | (253) |
| 第四节 长焦距摄影镜头有什么特点? | (266) |
| 第五节 短焦摄影镜头有什么特点? | (272) |
| 第六节 非球面在摄影镜头中有哪些应用? | (284) |
| 第七节 鱼镜头有什么特点? | (287) |
| 第八节 近距摄影有什么特点? | (291) |
| 第九节 微距摄影有什么特点? | (300) |
| 第十节 显微摄影有什么特点? | (303) |
| 第十一节 变焦镜头有什么特点? | (314) |
| 第十二节 红外摄影有什么特点? | (330) |
| 第十三节 感光底片有什么特点? | (335) |
| 第十四节 反射式和折反式摄影镜头有什么 特点? | (345) |
| 第十五节 常见的取景器有几种? | (353) |
| 第十六节 滤光镜的滤光原理是什么? 有多少种? | (367) |
| 第十七节 摄影与力学有关系吗? | (387) |
| 第十八节 放大机的放大原理是什么? | (391) |

第一章 镜头前的物理现象

第一节 为什么通过镜头能看到自然界的人和物？

一、为什么通过镜头能看到物体？

朋友，当您翻开影册时，各种画面就映入您的眼帘：巍然屹立的名山，汹涌澎湃的大川，姹紫嫣红的百花，展翅飞翔的雄鹰，乘风破浪的船队，英姿飒爽的国家仪仗队，川流不息的车流人浪……，这些能不令人心旷神怡吗？当您打开自己的相册，看到那些特定时空瞬间记录，能不令人浮想联翩吗？那么，这些多姿多彩的照片是怎样形成的呢？它涉及到多方面的知识，我们只从物理学角度加以简要说明。

我们能看到物体（或通过镜头看到物体）是因为物体能以不同方式反射、折射与吸收投射到它们上面的光。比周围背景能更强烈地反射光的物体，在较暗背景上看来是光亮的；比周围环境反射光线能力较弱的物体，看起来显得暗些。例如，白纸比灰厚纸的反射光强，所以在白纸上的一块灰厚纸看起来好像是灰暗的，而放在黑丝绒上的同一块灰厚纸，看来又好像是光亮的。一个物体，如果其反射光线能力与周围环境相近，那么，从视觉角度看就很难把它从周围环境中区别出来。对透明体而言，是通过它们的透射光看到它们的。如观察一个棱形的玻璃瓶塞子，好像很简单，其实它包含许多复杂的现象：一部分光被棱面反射，一部分光被磨砂的棱散射，而另一部分光则通过瓶塞发生折射透过。如果把完全透明的物体浸没在媒质里，若物体跟媒质的折射率相同，那么我们会看不到物体了。

光被吸收，其能量就有所损失，转变的能量将使吸收光的物体发热。这有时是需要的，如需要有一黑暗的背景，或消除不合要求的某方向的光，这时就要借助有强大的吸收本领的涂层（如把光学仪器内某些表面涂上黑色）。物体反射、折射和吸收光的程度通常用反射参数、折射系数和吸收系数表示：反射系数 = 反射光强度 / 入射光强度；折射系数 = 折射光强度 / 入射光强度。根据能量守恒原理，三者之和恒等于 1。当光照射某一物体时，若反射系数大，说明反射光强度大，而被折射和吸收的光都很弱。这些系数通常跟光的颜色（波长）有关。

来自物体（或通过镜头）的光若被眼睛接收，我们就看到了物体；若被胶片所接收，就获得了潜影，再经过光化处理，便可得到五彩缤纷的生活照。同理，工业、医疗、军事、航测科研等领域都可以得到各自的专业照片。

正常人眼能够看到大千世界的人和物，是由于来自外界物体的光线成像在视网膜上。某一物体在可见光的照射下，由于物体的反射、折射和吸收特性，使光的能量在空间的分布、功率大小以及光谱组成等方面都有所改变。物体各点发光强弱是不同的，对人眼视网膜上的锥体和柱体（杆体）细胞的刺激程度就不同。因而这些细胞产生的神经兴奋程度也不同，这种兴奋再传到脑，人们就看到物体表面明暗差别和整体形象。

二、物体在视网膜上的像原本是倒立的，为什么看到的却是正立的？

为了寻找答案，心理学家曾做过下列试验：他戴上一副特制的眼镜，这眼镜的光学系统，能使外界物体在视网膜上形成正立的实像：那像的上部落到视网膜上部，像的左侧落到视网膜左侧……但心理学家看到的视场却是颠倒的，一切东西都倒转了。开始特别不习惯，视觉跟触摸觉和动觉之间常乱套。他用手摸物体、在空间行动都发生困难：想拿上面的物体，手却常伸到下面；想拿右面的物体又常常把手伸到左面。但他力求使自己的行动符合客观实际，在一星期后，视觉逐渐与触觉、动觉协调起来，行动错误减少了。到 21 天后，他的行动又自如了，完全能适应这种新的空间关系，他看到的景物都正过来，周围的一切都恢复正常了。但取掉眼镜之后，又出现了整个环境倒转现象，再过几天才能恢复正常。由上述实验可知：人们观察到的事物不是由视网膜上的像唯一确定的，人在认识外界时，各种感觉器官（视觉、触觉、运动觉）作为一个统一主体协同活动、相互验证，通过实践活动，最后才能正确反映客观现实。

其实看东西时物是正立的，视网膜上的像一定是倒的。

第二节 为什么镜头前的世界是五颜六色的？

很早就有许多人对颜色问题进行了探讨，曾消耗了不少人的才智。一些科学家曾作过无数次观察，有日常生活方面的，也有科学研究方面的，但直到牛顿对这个问题研究以前一直没有定论。曾经有人认为，颜色是物体本身的一种性质。但经过仔细观察后发现，物体的颜色随一天内的不同时刻或不同照明状况而有显著变化。有人说物体的颜色是光亮与黑暗的“混合物”，这都是不对的。直到牛顿通过实验才揭示了颜色问题的本质。现在人们已经知道物体的颜色除了跟物体本身的特性（反射、折射和吸收）和光的特性（波长或频率）这些客观因素有关外，还跟人的主观因素密切相关。故此涉及到生理光学（包括眼的视觉、色觉和幻觉等）光度学（各种光量），色度学（主要研究颜色测量和颜色视觉规律）等各方面知识。

一、为什么白光能分解出七种色光来？

牛顿通过如图 1 - 1 所示的装置就可以把白光分解出七色光。使一束平行的白光通过一个狭缝 S 射到三棱镜上，光通过棱镜后，能在棱镜后方的屏上形成相当宽的一条具有各种鲜明颜色的带。这条光带的一端是红色，另一端是紫色，中间依次排列着橙、黄、绿、蓝、靛各种颜色。各种颜色是随光的波长连续变化的，因此，各种颜色的分界线带有人为约定的性质。把白光（复色光）分解成单色光的现象叫色散。由色散形成的色光按一定次序排列的光带，叫做光谱。每一种单色光都对应着一定的波长（实际是一小波段）如表 1 - 1 所示。（在紫色外有不可见的紫外线，在红色之外有不可见的红外线。）而这些光都不能再分解了，它们叫做单色光。如果令这些单色光会聚又可得到白光（叫光的复合）。

表 1 - 1 （波长单位为 nm）

| 光谱区域 | 波长 | 光谱区域 | 波长 |
|------|-----------|------|-----------|
| 紫 | 400 ~ 450 | 黄 | 570 ~ 590 |
| 蓝 | 450 ~ 490 | 橙 | 590 ~ 610 |
| 靛 | 490 ~ 501 | 红 | 610 ~ 700 |
| 绿 | 501 ~ 570 | | |

二、物体的颜色是由什么决定的？

1. 光的颜色是由什么决定的？

光的颜色是由光的波长（或频率）来决定的，每种单色光都有各自的频率。如 400 ~ 500nm 蓝色光，500 ~ 600nm 绿色光，600 ~ 700nm 红色光。

2. 透明体的颜色是由什么决定的？

透明体的颜色是由它折射（即透射的）光的颜色决定。例如红色玻

璃，对红光折射系数很大，对其它光的吸收系数也很大。所以，红光发生折射而其它光大部分被吸收；而无色透明体，它对各种单色光的折射都同样的强（折射系数都很大），而吸收系数都很小，因此，各种色光都能透过物体，此种物体便是无色透明体。

3. 非透明体的颜色是由什么决定的？

反光物体的颜色是由其所反射光的颜色决定的。白色物体，是对各种色光的反射系数都同样大，而吸收系数和折射系数都很小，因为它反射了所有色光而成白色（叫白体）；黑体，是完全吸收照射光的物体；一般黑色物体，是指在入射白光的各波长中，能均匀吸收各种单色光绝大部分能量的物体；中性灰色物体，是对各单色光吸收的部分小于反射的部分，也就是介于黑体和白体之间的物体。物体的颜色通常是指在白光照射下所呈现的颜色。如红色物体在白光照射下只反射红光而吸收所有其它色光；如果一个物体反射一种光，折射另一种光而吸收其余的光，那么就会从反射光中看到一种颜色，而从折射光中看到另一种颜色。例如叶绿素的酒精溶液（酒精提出物），它只反射绿光，折射红光而吸收其余光，从反射光中看到它是绿色的，从折射光中却看到它是红色的。总之，发光物体的颜色是由所发出光的颜色所决定；反光物体的颜色是由所反射光的颜色决定；透光物体的颜色是由所透射光的颜色所决定。

三、彩色的三要素是什么？

颜色可分彩色和非彩色两大类，这两类的总称叫颜色。非彩色指的是白色，黑色和各种深浅不同的灰色。彩色是指黑白系列以外的颜色。彩色要用三要素（特性）来描述才能表述人眼对不同颜色的感觉，只从各种色光的波长不同来区分那是不完全的，还应同时采用色调（色别或色相）、饱和度和亮度（明度）等来加以区分。

色调决定于物体反射（或折射）光的波长，是颜色质方面的特征；饱和度决定于反射（或折射）光中所混入白色的数量，物体颜色中纯光谱色的含量愈多，饱和度愈高；亮度决定于反射或折射光的强度，可理解为反射（或折射）光引起视觉刺激的程度，是物体颜色在“量”方面的特征。色调和饱和度合称为“色品”，是颜色的色度学特征。

四、人眼的视觉对光的灵敏度有什么规律？

人的视觉器官在发展史上是从动物眼睛发展进化而来的。在漫长的进化过程中，由于对太阳光线物理特性的适应，形成了人的视觉器官的特殊结构——复杂构造的眼球以及视网膜上的锥体细胞和柱形（或杆形）细胞。

视觉的光化理论指出，人类和动物的视觉跟一些光化学变化有关。在光的作用下，视网膜内的一些特殊物质（视紫素）就发生分解；分解物刺激了视神经而产生光的感觉。因为视神经有许多分支，散布在视网膜表面上，所以刺激的性质就依这种光化分解发生在视网膜上的什么地方和达到什么程度而定。

在单位时间内被分解的光敏质（视紫素）的量决定了对光感觉的强弱。眼睛对光有很强的适应本领，可通过下述方法实现：眼睛可以通过

改变瞳孔的直径即改变瞳孔的面积，使视网膜上的照度在 20 倍的范围内变化；眼内有不透明色素（一种染色体，能大量吸收光），在光的作用下这种色素移动到感光膜前面，保护感光膜使它不受太强光的刺激，当光较弱时，它就移走，让感光细胞暴露出来；通过圆锥或圆柱两种细胞的不同作用来适应光强弱不同的外界环境。

圆锥细胞数目可达七百万，绝大部分分布在视网膜中部，相对而言它对光的感觉不太敏感，只在光较强时才能感觉到光，同时能辨别颜色和分辨物体的详情细节。它叫白日（或亮）视觉。颜色视觉的三色理论认为圆锥细胞（或每个圆锥细胞里）有三种机构，它们分别对绿、红和蓝敏感，当三种颜色作各种不同组合时，就可产生各种颜色的感觉。人眼对可见光中不同波长的光敏感度并不相同：在明亮条件下对黄、绿光敏感度最高，对红和紫光敏感度最低；在阴暗条件下对绿光敏感度最高，对红和紫光的敏感度还是最低。圆柱细胞对光特别敏感，在微弱的光照下起主要的视觉作用，所以它也叫暮曙（或暗）视觉。圆柱细胞的数目超过一亿，分布在视网膜的外围，它对光的敏感度比圆锥细胞大得多，但分辨颜色的本领却差得多。它对各种波长的光敏感度虽不相同，但其极大值在波长较短的区域，所以在光很弱时，主要起视觉作用的是圆柱细胞，各种波长的光引起同一种蓝灰色的感觉。

通常是两种感光细胞在不同程度上都同时起作用：在光较强时圆锥细胞起主要作用；在光较弱时圆柱细胞起主要作用。例如，在强烈的照明情况下，看到的红的色调比蓝的色调亮，而在同样的光谱成分的光束作微弱的照明时，看起来倒觉得蓝的色调比红的色调亮。这主要因为两种细胞对色调的敏感度不同：前者是白日视觉在起主要作用，它对红光的灵敏度高；而后者是暮曙视觉起主要作用，而它对蓝色最敏感。

五、什么叫加色效应？什么叫减色效应？在摄影中是怎样复现的？

（一）加色效应与减色效应

1. 加色效应：两种以上色光同时进入人眼，刺激视网膜锥体细胞，可使大脑获得另外一种色调的色觉。这种由两种以上色光彼此叠加后所产生的综合色觉效果叫做光的加色效应。加色效应的理论依据是颜色混合定律。1854 年格拉斯曼（H·Grossmarm）将颜色混合现象总结成颜色混合定律：

人的视觉只能分辨颜色的三种变化：色调、亮度和饱和度；

在由两个成分组成的混合色中，如其中一个成分连续变化，混合色的外貌也随之连续变化。由此可导出下列二定律：

a) 补色定律：每一种颜色都有一个相应的补色。如果某颜色与其补色以适当比例混合，便产生白色或灰色（如红与青、蓝与黄、绿与品红）；若两者按其它比例混合，便产生近似比重大的颜色成分的非饱和色。

b) 中间色定律：任何两个补色相混合便产生中间色，其色调决定于两颜色的相对数量，其饱和度决定于二者在色调顺序上的远近。

颜色外貌相同的光，不管它们的光谱组成是否一样，在颜色混合中具有相同效果。

混合色的总亮度等于组成混合色的各颜色光的亮度的总和（也叫

亮度相加定律)。以上定律只适用各种色光的相加混合,不适用于染料或涂料的混合(它们属于后面讲的减色效应)。

摄影者在拍摄彩照时,必须考虑加色效应对摄影画面的影响,如绿草地上或绿树丛中的人(或物)常常带有绿色调;红色(如红墙或红旗等)背景下的人常带淡红色调;蓝色天空下的海水显得更蓝,而阴暗天色下的海水却显得灰蒙蒙……。上述情况有时可以加以利用,更多的情况下则需要克服,可用其相应的补色加以中和。

2. 加色效应中的三原色为:红(R),绿(G),蓝(b)。若三原色按不同比例叠加混合,理论上说这种混合可模拟出自然界中的各种颜色,包括黑白系列的各种灰色和各种色调和饱和度的颜色及可见光谱的全部颜色。实际上,这种混合是不能配出自然界所有的一切颜色的。

不同的颜色刺激同时作用到视网膜邻近的部位,也能产生颜色混合效应。如彩电荧光屏上,密集地布满小的红、绿和蓝的发光荧光粉条或粉点,它们刺激视网膜非常邻近的锥体细胞,以致视觉不能区分独立的粉条或粉点。通过调节屏幕上相邻的三色粉条或粉点的亮度比例,就在视觉上产生各种颜色的混合效果。

三原色不只是红、绿和蓝三色,也可以是其它三种颜色。条件是三原色中的任何一个不能由其余两个相加混合获得。不过经证明红、绿和蓝是最优三原色。红、绿和蓝的互补色分别为:青(C),品红(M),黄(Y)。能配成白光的两种颜色称为互补色。加色效应如图1-2所示。

3. 减色效应:从含有多种色光的复杂可见光(如白光)中,减去若干单色光,获得另外一种光的效应叫减色效应。减法混合的原理比加法混合原理复杂,两者的混合过程及结果都不同。如根据颜色相加原理,将两束白光分别通过蓝滤色片和黄滤色片,投射到屏幕上进行相加混合,由于蓝光和黄光是互补色,得到的合成光是白色。但在蓝滤色片和黄滤色片的减法混合中(如让白光先后通过蓝滤色片和黄滤色片的光即为减法合成光),混合色不是白色而是绿色,即加色效应是不同比例原色光直接相加混合,而减色效应是从复合光中减去几种不同比例的原色光而得各种色彩。

在颜色相加混合中是通过控制三原色(红、绿和蓝)来获得最多的混合色。那么在减法混合中想什么办法也能通过控制红、绿和蓝来获得较多的混合色呢?为此,在减法混合过程中应用了三个“减法”原色——即红、绿及蓝的补色。调节三种补色来控制绿、红、蓝。三个“减法”原色分别为:青“减法”原色,也叫“减红”原色,因为它印在白纸上,由白光照射时呈现蓝绿色称青色,是控制红色用的;“减绿”原色——品红“减法”原色,印在白纸上白光照射下呈红紫色(品红),是控制绿色用的;“减蓝”原色(即黄色“减法”原色)印在白纸上在白光照射下呈黄色,是控制蓝色用的。

光的减法混合应用很广:染料涂料、彩色印刷、彩色摄影等。减法三原色是通过什么来控制或减掉三原色(红、绿、蓝)的呢?是通过减法原色材料密度的变化来实现的。当各减法原色材料密度大时将吸收较多的红、绿、蓝成份;密度小时,则能透过较多的红、绿、蓝成分,从而通过控制红、绿、蓝成分多少而获得更多的减法混合色。图1-3是减色效应示意图。(二)加色效应及减色效应在摄影中的复现彩色摄影是

根据三原色原理，对被拍摄物体进行颜色分解和合成两个步骤来得到原物的彩色影象。分解的方法是将物体的颜色分解成红、绿、蓝三原色分别记录在胶片的不同感光层上。合成的方法可以采用加法（如图 1—2 所示的三原色的不同组合）；也可以采用减法（三减法原色的不同组合如图 1 - 3 所示）。三原色滤光层及三减法原色（三补色）滤光层，对色光的吸收和透射情况是不同的，前者只能透过本色光，吸收其它色光；后者吸收与其互补的原色光，透过本色光或构成本补色光的两种原色光。上述两种情况如图 1 - 4(a)、(b)所示：

1. 加法复现彩色照片的主要过程：用色密度较大的红、绿、蓝色滤色片，通过负片对彩色相纸进行三次曝光，每一次曝光，仅是彩色底片上的补色负象的一部分，使彩色相纸上的一层乳剂膜受感（一种单色正象在相纸上形成）。具体情况：白光（或近似于白光）通过红滤色片时，彩色相纸的显青色层就感受透过底片的红色光线；当白光通过绿滤色片时，彩色相纸的显品红色层就感受透过底片的绿色光线；当白光通过蓝色滤色片时，彩色相纸的显黄色层就感受透过底片的蓝色光线。通过上述三次曝光，底片上的三层补色负像即可在彩色相纸上全部还原。因为加法复现彩色照片的程序比较复杂，目前很少用。

2. 近代彩色摄影大部分采用减法法。为了记录自然界的人和物的各种颜色，在胶片的片基上涂有三层不同感色性能的乳剂膜层，来记录三原色（红、绿、蓝）。三乳剂层分别含有各自补色的成色剂。上层感蓝色光，含有黄色成色剂；中层感绿色光，含有品红色成色剂；下层感红色光，含青色成色剂。在上、中两层间涂有黄色药膜，用来阻止蓝色透过，因中下层也感蓝光，这层黄色药膜在冲洗时便自行消退。当彩色负片曝光显影以后，便可形成三原色的补色影像层。感蓝光的上层形成黄色影像层。感绿光的中层成品红影像层；感红色光的下层形成青色影像层。白光通过彩色及负片上的黄、品红、青三个补色影像层时，三者分别成为“减兰”、“减绿”、“减红”原色的作用，使被摄物体的颜色转变为其补色，故而看到彩色负片上的颜色都是与原物相反的补色。在晒印时，因为正片或相纸跟负片的制造原理相同，因此当白光通过负片补色影像对它们一次曝光后，再经冲洗便可还原物体的颜色。

第三节 光与影在摄影中有什么作用？

一、为什么到了夜间自然界的颜色就消失了？

我们通过镜头看到自然界中五颜六色的物体，是因为眼睛接收了通过镜头来自物体发射、反射、散射或折射的光。而大多数物体是不发光的，在夜间便没有阳光供其反射或折射，当然我们就看不到五颜六色的物体。人类在跟黑暗的斗争中，创造出多种人造光源战胜了黑夜，即在夜间也可以象白天一样的生活、工作和摄影。

二、光度学中常用的物理量有哪些？

人类在同黑暗的斗争中创造了多种光源，任何光源都涉及到对其辐射能的量度问题。在光学中与能量有关的量有两类：一类叫辐射度学量，如辐射能、辐射通量、辐射强度、辐射亮度、辐射照度等，它表示辐射能的大小；另一类是生理的收做光度学量，它表示人眼对辐射能的视觉强度，有时两者没有必要加以区别。

1. 光通量（即光流）

光通量表示光源表面的客观辐射通量对人眼所起的视觉强度，它等于辐射通量与视见函数的乘积，光通量的单位为“流明”。不计相对视见率的辐射通量单位为“瓦特”。“流明”——发光强度为1烛光的点光源在单位立体角（1球面度）内发出的光通量。

2. 发光强度

发光强度是表示光源在一定方向范围内发出的可见光辐射强弱的物理量，单位为“烛光”。如不包括相对视见率时，光源的辐射强度是单位立体角中全部辐射通量，单位为瓦特/球面弧度。相对视见率又叫“视见函数”。不同波长的光对人眼的视觉灵敏度不同。一般说，人眼对黄绿光最灵敏；对红光和紫光都不灵敏；而对红外光和

紫外光，则无视觉反应。所以人眼对波长为 5550Å 黄绿光的视见率为最大，取为1；其他波长的可见光的视见率均小于1；红外光与紫外

光的视见率等于零。某波长光的视见率与波长为 5550Å 的黄绿光视见率的比称为该波长的相对视见率。在不同条件下，视觉灵敏度是不同的，上述视见率是指白日视觉（亮视觉）的情况下。暮曙（暗）视觉则不同。两者的区别如图1-5所示的明视觉和暗视觉的视见函数曲线可见，图中横坐标是波长，单位为纳米（nm），纵坐标为视见率（相对视见率）。

3. 照度

物体单位面积上所得到的光通量，其单位为勒克司。

4. 亮度

亮度表示发光面发光强度并与发光面特性有关的物理量，可以用单位面积的光源表面在法线方向单位立体角内传送出的光通量数值来量度。

三、什么叫光源？光源的种类有哪些？

在物理学中，将能够发光的一切物体都叫光源。任何发光物体的发光过程都是电磁波的辐射过程。从不同角度把光源可分为：自然光源和人造光源；热辐射光源和非热辐射光源；普通光源和激光光源；热光源、气体放电光源、固体光源、自然光源和激光光源等。了解了光源，就能掌握摄影的主动权。为适应日常生活、生产和各种科学技术及摄影等方面的需要，必须有各种不同光学性质和结构特点的光源。在成份分析、结构研究、检验测量等方面光源都是必不可少的，同时在很多情况下，常起着关键性的作用。在摄影技术中，光源显得更为重要，因为没有光，影也就不复存在。无光无影就无从谈摄影。

1. 什么叫热辐射？

发光过程就是辐射过程，要维持这一过程必须不断补给发光体以能量。不断给物体加热来维持一定的温度，物体就会持续发光。这种发光叫做热致发光，如太阳、白炽灯、碘钨灯、溴钨灯等的发光都属热致发光，或叫热光源。热辐射的微观机理是什么呢？

在热光源中，大量的分子和原子在热能的激发下，从正常的稳定态（基态）跃迁到激发态（非稳定态），在它们从激发态返回正常态的过程中，都将辐射发光（电磁波）。各个分子或原子的激发和辐射参差不齐，而且彼此之间没有联系，因而在同一时刻，各个分子或原子所发出的光波的频率、振动方向和相位也各不相同。另外，分子或原子的发光是间歇的，一个分子或原子在发出一列光波后，总要间歇一段时间后才再发出另一列光波，对同一个分子或原子而言，在不同时刻所发出的光波的情况也不一定相同（由被激发的状态决定）。就某一时刻，不同分子或原子可同时发出不同频率的光。因此宏观上看到的是复合光（白光）。

2. 什么叫非热辐射？

各种气体灯的发光过程是靠电场补给能量，这样的过程叫做电致发光。某些物质在放射线、X射线、紫外线，可见光或电子束的照射或轰击下，可发出可见光束，这种过程叫做荧光（光致发光）。像日光灯管壁上的荧光物质、示波器管或电视显像管中的荧光屏的发光属于此类。有的物质在上述各种射线照射之后，可以在一段时间内持续发光，这种过程叫做磷光，夜光表上的磷光物质的发光属于此类。由于化学反应而发光的过程，叫做化学发光，如腐物中的磷在空气中缓慢氧化发出的光（如坟地上有时出现的“鬼火”）属于此类。生物体（如萤火虫）的发光叫做生物发光，仍是特殊类型的化学发光过程。应当指出，能量形式可以互相转化，上述光的各种发射过程不能截然分开，同一光源中的光发射过程也往往不是单一的，如日光灯，即可看作是电致发光（水银蒸气发出紫外线），又可认为是光致发光（紫外线激发荧光物质发出可见光）。

3. 什么叫气体放电：

根据气体放电原理制成的气体灯种类很多：开放式气体放电光源；气体灯（封闭的气体放电光源）。前者有：直流电弧、高压电容火花、高压交流电弧等。后者可分：辉光放电气体发光管、汞灯、钠灯、金属卤化物灯、氙灯、脉冲灯（包括万次闪光灯），燃烧式闪光泡、原子光谱灯等。

气体放电：气体具有异电性时，电流经过气体的现象就叫做气体放电。通常情况下气体是良好的绝缘体，它怎么能导电呢？一般而言，形成电流必须具备两个条件：一要有可移动的电荷（如电子、离子等），二要有使电荷作定向运动的力（电场）。气体放电有两种：被激放电。用火焰将气体加热或用紫外线，伦琴射线，放射性元素的射线等照射气体时，都能使气体电离而导电，但外界作用停止，气体又将恢复为绝缘体；气体自激放电：当加在气体（两极）上的电压足够大时，即使停止外界使它电离的作用，而放电过程仍然继续，这种放电叫做自激放电，这时的电压 V_0 叫做点燃电压。因为气体中总有少数离子存在（如宇宙射线等激发），离子在足够大的点燃电压 U_0 作用下，获得足够的能量。当正离子到达阴极时，与阴极碰撞，可使阴极发射电子，这种电子在强电场中加速，能量增加很快。这些被加速的电子，跟中性原子或分子碰撞时，不但不为原子或分子俘获成为负离子，反而能使原子或分子因碰撞而电离，并放出电子，这种电子被加速后又与原子或分子碰撞发生新的电离，因此电子群向阴极运动过程中，电子数目急剧增加。在自激放电中，由于负离子不易形成，又因正离子的速度比电子的速度小得多，因此在气体自激放电中主要导电机构是电子。气体放电（导电）往往同时伴随着发光现象。气体放电过程与很多因素有关：一是跟气体的压强有关。当气体的压强较低时（稀薄气体），自由程就长，在相继两次碰撞的时间内积累起来的能量就大，易于碰撞电离，故容易放电；二是跟电场强度有关。通常情况下，电场强度大时容易放电；三是跟电极的形状、位置、温度、材料等都有关。因此，利用不同条件，可制造出满足各种需要的气体放电光源。其中常利用辉光放电原理制成各种荧光灯和利用弧光放电原理制成不同类型的弧光灯。

四、摄影中常用的照明灯有哪些？

1. 什么叫新闻碘钨灯？

新闻碘钨灯是卤钨灯中的一种。卤钨灯也是一种白炽灯，是根据电流的热效应原理制成的。白炽灯的灯丝温度越高，它所放出的光辐射能越多。灯丝是白炽灯的主要部分，用作灯丝的材料必须满足：熔点高。对于大多数材料而言，随着温度的升高，辐射的总能量及可见光在辐射中所占的比重都增加，因此，材料的熔点高就可以实现高的工作温度；蒸发率小。蒸发率是决定白炽灯寿命的基本因素，二者成反比关系；可见辐射选择性好，即在可见光区有较多的能量辐射。经过比较，钨是适合的材料，而且它的机械强度大，易于加工成丝。因此，几乎所有的白炽灯都用钨作灯丝。抽出空气的灯泡内充进惰性气体，目的在于抑制灯丝蒸发。因为灯丝在高温下工作时，蒸发出来的钨原子与惰性气体分子发生频繁的碰撞，从而使钨原子可以反射回钨丝表面。在同样寿命下，充气灯可提高灯丝工作温度，从而提高光效。为了进一步延长灯的寿命，提高光效，在充气钨灯的基础上又制成了卤钨灯（如碘钨灯，溴钨灯等）。主要原理是卤钨循环：高温下从灯丝蒸发出来的钨在泡壁附近与卤素反应，生成挥发性的卤钨化合物。当卤钨化合物扩散到灯丝附近时，又分解为卤素与钨，释放出来的钨沉积在灯丝上，而卤素则又扩

散到低温的泡壁附近与蒸发出来的钨化合。这一过程叫做卤钨循环，或钨的再生循环。这样，不仅可以大大提高灯丝的工作温度和灯的光效，而且泡壳在燃烧过程中并不发黑。

根据用途的不同，灯丝和泡壳可以作成不同的形状，如灯丝可作成点状、线状、排丝型、带状等，但都必须考虑灯丝跟泡内气体接触时少放出热量，从而使灯丝热得快，提高灯丝的工作温度。为了改善泡壳的透射光谱，泡壳材料还可采用石英玻璃，硅氧玻璃等。为了使金属线发热时玻璃不会破裂，经过玻璃内的金属线，是由一种热膨胀系数跟玻璃热膨胀系数相同的金属制成。为了使电灯便于接通电流，在灯丝上须附装一用油灰固定在灯泡上的金属灯头。灯泡头是由具有螺纹槽的金属套筒及跟套筒绝缘的接头构成，接通灯丝的两条导线，分别焊接在灯泡头的套筒和接头上。

2. 什么叫金属卤化物灯？

金属卤化物灯的出现，是因为金属卤化物有如下特点：金属卤化物的蒸气压一般都比金属本身的蒸气压高得多；除金属氟化物外，其它金属卤化物都不与石英玻璃发生明显的化学反应；在是弧温度（大于 2 500 开尔文）下可稳定，因此，才易于分解成金属和卤素，利于获得高的蒸气压；在管壁温度下又要稳定，不会在管壁析出金属。一般金属卤化物都具有上述特点。其中碘化物较优越，故在摄影灯中应用最广。大多数金属卤化物灯内都充有汞，其作用是：提高灯的发光效率；改善灯的电学特征；有利灯的启动。金属卤化物灯的管壁与电弧中心的温度相差很大，金属卤化物会发生分解和再复合。其循环过程是在管壁的工作温度下，金属卤化物大量蒸发后，在电弧中心的高温区（约 400 ~ 6 000 开尔文），金属卤化物的分子分解成金属和卤素原子。金属原子产生放电并辐射发光。而由于电弧中心区金属原子及卤素原子浓度高，它们又向管壁扩散，并在管壁附近的低温区重新复合成金属卤化物分子，就靠这种循环，不断向电弧中心提供足够浓度的金属原子。

金属卤化物灯的种类很多。如：碘化钠、碘化铯、碘化铟灯（简称纳铯铟灯）、超高压铟灯、卤化锡灯、镝灯等。（1）镝灯，其显色性好，光效高。因此，它不仅是很好的照明光源，同时也适用于拍摄彩色影片和彩色照相制版。因为稀土金属（如镝、铽、铕等）的光谱在整个可见区有十分密集的谱线，因此，在灯内采用此种金属碘化物则可产生显色性很好的光。这种灯的显色性能随稀土金属分压强的提高而改善，所以升高灯管工作温度可获得光色更好的白光。如果在镝灯内添加铽和铕的卤化物，还能进一步提高显色性。在镝灯内，卤化物对管压有较大贡献。一般汞对管压的贡献为 70% 左右，金属卤化物对其贡献约为 30% 左右。

（2）超高压铟灯，尺寸小，光效高，光色好，适用电影放映用光源，也可作为显微投影仪的光源。

（3）卤化锡灯，一般采用氯化锡——碘化锡——汞的组合，或碲化锡——溴化锡——汞的组合。此种灯的显色性极好且具有稳定性，因此，它不仅适用于室内照明，也可用于印刷和染色及摄影等场合。

3. 什么叫万次闪光灯？

万次闪光灯是脉冲灯中的一种。此种灯能在极短时间内发出很强的光。图 1 - 6 所示为其工作电路。电压为 V_0 的直流电源经充电电阻 R

使贮能电容 C 充电到工作电压 V_0 。 V_0 一般低于灯的自击穿电压，而高于其着火电压。脉冲灯管外绕有触发丝。工作时，在触发丝上施于高脉冲电压，使灯内产生电离火花线。火花线大大减少了灯的内阻，使 C 内贮存的大量能量能够在极短的时间内通过脉冲释放出来，产生极强的闪光。放电过程大致可分为瞬态和隐态两个阶段。

图 1 - 6

照相常用脉冲氙灯（万次闪光灯）。这种灯的泡壳常用硬玻璃制成。电极芯柱和螺旋都用钨，并涂有电子粉。此种灯的光色跟日光接近，适于作彩色摄影光源。

脉冲灯的种类很多，共同的特点是亮度很高，所以被广泛的用于摄影光源、激光器的光泵、印刷制版源等。

五、什么叫光源的色温？

1. 光源的光谱功率分布与色温有什么关系？

任何光源（包括热光源的非热光源）的发光过程都是辐射过程，所辐射的光都是由不同波长的辐射组成，各个波长的辐射功率也不相同。光源的光谱辐射功率按波长的分布叫做光谱功率分布。不同光源，由于发光物质的成分不同，它们的光谱功率分布也不同。一定的光谱功率分布就对应着一定的光色。那么，如何用温度来描述（表示）光色呢？这就需要选择一个“标准”（黑体），用它的温度来“量度”实际光源的颜色温度。

什么是黑体呢？

我们把在任何温度下都能完全吸收照射其上的任何频率辐射能的物体叫做绝对黑体，简称“黑体”。黑体辐射完全可用普朗克辐射定律来描述。实际上把任何物体做成空腔，在它很小的开口处就是个相当理想的黑体。黑体在不同温度下，在可见光谱范围内的相对功率分布曲线如图 1 - 7(a)所示，跟图(a)对应的色度轨迹如图(b)所示（即色品图，简称色图）

什么叫色品图呢？

我们知道，视觉对不同波长所引起的不同色调感觉，可以用红、绿、蓝三原色按照不同比例来调配而得。国际照明学会规定把它们之间的百分比分别用 x 、 y 、 z 来表示。由于是百分比，三者相加必等于一，所以色调实际只要用 x 、 y 两值来表示即可。将光谱色中各段波长所引起的色调感觉在 xy 平面作成图标时，即得色图。因白色的感觉可用等量的红、绿、蓝三色混合而得，因此，图中愈接近中心的部分，表示愈接近白色，也就是饱和度愈低；而边缘曲线部分则饱和度最高。因此色图中一定位置相当于物体颜色的一定色调和一定饱和度（一定色品）。

什么是色温？

从上述两图可知：一定温度的黑体，必有一定的光谱功率分布；一定的光谱分布对应一定的颜色。人们就用黑体加热到不同温度所发出的

不同光色来表达一个光源的颜色，叫做光源的颜色温度，简称“色温”。例如，一个光源的颜色与黑体加热到绝对温度 3 000K 所发出的光色相同，此光源的色温则为 3000K。在色图上对应的坐标值： $x = 0.437$ ， $y = 0.404$ ，此色度点刚好落在黑体轨迹上。有的光源的光色在色度图上不一定准确地落在黑体轨迹上，但常在该轨迹附近，也就是光源的色度坐标并不恰好是黑体轨迹上的色度坐标，所以用光源与黑体轨迹最接近的颜色来确定该光源的色温，这样确定的色温叫做相关色温。色温常用热力等温标，单位以“开尔文”（符号 K）表示。温标就是温度的标尺（有多种），摄氏温度 t 跟热力学温度 T 的关系为：

$$T = (t) + 273.157K \text{ (要求不太精确时可取 } 273) \text{ (1-1)}$$

2. 色温对彩色摄影有什么影响？

色温对彩色摄影有很大的影响。它与彩色有极密切的关系。只有当感光材料的特性与光源的色温相符合时，红、绿、蓝三种色光才能得到平衡，获得理想的彩色景象。例如日光型彩色片，当色温在 5 600K 左右时，拍摄不同景物都能得到良好的彩色效果。当色温偏低时，照片上反映出来的颜色偏红；当色温偏高时，则照片上的颜色偏蓝。专供碘钨灯照明的灯光型彩色片，色温要求一般在 2 800K ~ 3 400K 之间，可正确地再现被摄对象的色彩。

在复杂的情况下，要根据彩色胶卷的特性，对色温加以校正，一般校正的方法就是加用滤色镜，用滤色镜来校正或补偿色光，使色彩获得平衡。常用的滤色镜有紫外线滤色镜（UV 滤色镜）、蓝色滤色镜、橙色滤色镜（雷登 85#）等。

3. 什么叫光色的舒适感？

在人类视觉器官发展和进化中，一直习惯于日光和火光。人的眼睛在白昼一直适应自然光。太阳的辐射光是连续光谱，日出前和日落后色温较低。约 2 000 ~ 4 000K，中午和阴天色温较高，约 5 000 ~ 7 000K。在自然条件下，人在夜晚利用火光进行照明。在原始时代，人们点燃篝火，后来就发明了油灯和蜡烛等，人工光源，火光的光谱也是连续的。目前，人造光源种类很多。那么最优光色是什么呢？研究结果表明，光色的舒适感跟照度有关系，低照度时的舒适光色是火光（篝火、烛光、油灯光）的低色温光色；偏低或中等照度时，舒适的光色是接近黎明和黄昏时的、色温略高的光色；高照度时，舒适的光色是接近中午的阳光或偏蓝的高色温天空光色。照度与光色舒适感的关系只是色觉的偏好而已（是习惯）。不同色温的人工光源并不影响视觉辨认细节的能力。实验证明：在白炽灯（相关温度约 2 900K），荧光灯（色温约 6 500K），高压汞灯（色温约 5 500K）三种色温的光源照射下，在它们的照度相同时，视觉辨识细节的能力是没有差别的。自然光和一些常用人工光源的色温的比较如表 1 - 2 表示。表中的光源（A、B、C）都是规定的标准光源。

表 1 - 2 自然光和人工光源的色温

| | 自然光 | 色温(K) | 人工光源 |
|-------------|--------|--------|------------------|
| 天 空 光 | 西北方蓝天空 | 28000 | |
| | | 26000 | |
| | | 24000 | |
| | | 22000 | |
| | | 18000 | |
| | 薄云蓝天空 | 16000 | |
| | | 14000 | |
| | 蓝天空 | 12000 | |
| | 阴天天空 | 10000 | |
| | 日 光 | 平均中午日光 | 8000 |
| 下午3时半 | | 6000 | 日光色荧光灯, 高压汞灯, 氙灯 |
| 4时半 | | 5500 | 光源B(4874K) |
| 2小时 | | 5000 | 金属卤化物灯 |
| 1.5小时 | | 4500 | } 白炽灯 |
| 1小时 | | 4000 | |
| 45分钟 | | 3500 | |
| 30分钟 | | 3000 | 溴钨灯 |
| 20分钟 | | 2500 | 光源A(2856K) |
| 日出 | | 2000 | 碘钨灯 |
| | | | 高压钠灯 |
| | | | 蜡烛灯 |

六、什么是光源的显色性？

随着科学的发展和技术的进步，许多国家都研究试制了新型人工光源，并已经取得了显著成绩。这就涉及到如何评价新光源的优劣。一是技术方面的指标。发光效率和使用寿命。二是显色性。什么叫光源的显色性呢？把一个光源对物体颜色外貌的结果跟选定的光源对物体颜色外貌的结果相比，若一致，此光源显色性就好，否则就不好。在日常生活中，我们可以把白炽灯和日光灯作为标准，认为在这两种光源下看到的颜色是物体的“真颜色”。而在荧光灯、汞灯、钠灯等光源下看物体的颜色则有所不同，例如，在日光下观察一块花布，再将其拿到高压汞灯下观察，就会发现某些颜色已变了色。如粉色变成了紫色、蓝色变成的蓝紫色。这说明，在高压汞灯下，颜色发生了失真。

在色度学中，按 CIE(国际照明委员会)的规定，把普朗克辐射体(如黑体)作为低色温光源的参照标准，把标准照明体 D(也叫典型日光或重组日光)作为高色温光源的参照标准。用上述尺度衡量，白炽灯和日光灯是显色性最好的光源，高压汞灯等虽然发光效率很高，但显色性却很差。因为光源显色性跟光源的光谱功率分布有关。

1. 什么样光源显色性好？

具有连续光谱的光源显色性好。由于汞灯等新光源的光谱不是连续的，光谱中缺少某些单色光的成分，在它们下面观察物体时，某些颜色就会发生变色。

由几个特定颜色光组成的混合光源也具有很好的显色效果。如光谱 450 nm(蓝)，540nm(绿)，610nm(橘红)波长区的辐射，对提高光源的显色性具有特殊效果。用这三个颜色光以适当比例混合所产生的白光(高度不连续光谱)，跟具有连续光谱的光源一样都有同样好的显色性。当用一个仅由上述光谱成分组成的光源去照射肤色、肉类、蔬菜、叶丛等常见物体时，有经验的观察者对这些物体的颜色质量给予很高的评价。在上述混合光源中，缺少 500nm 及 580nm 波长附近的光谱成分。此两个波长对显色不利，叫做干扰波长。若用含有这种波长功率的光源照明有颜色物体，一些颜色便会失真。通过光源的混合可以提高光源

的显色性。例如白炽灯跟高压汞灯的混光、高压钠灯跟高压汞灯的混光等。混光光源都具有较高的光效，同时，能使其显色性有一定程度的提高。

2. 光源的显色性对彩色摄影有什么影响？

如果摄影用的光源光谱成分的变化会引起人所观察的物体的颜色发生变化，就会影响彩色摄影的颜色还原效果（包括彩色电影和彩色电视的颜色还原效果）。在日光下，彩色底片或彩色摄像机对各种颜色能提供与原景物近乎同样的还原效果。所以拍摄外景时颜色还原最好，复现的颜色符合人们的习惯，色调不失真。白炽灯、碘钨灯、溴钨灯、镝灯等几种光源的显色性都比较好，适用于辨别颜色要求高的视觉工作、彩色电影的拍摄、染料、彩色印刷、纺织、食品工业和商业等。特别是溴钨灯、镝灯这两种新光源拍摄和放映彩色电影，屏幕上的影像色彩很鲜艳，清晰逼真，在其它方面的应用也有广阔的前途。

但有时，却要有意歪曲某些颜色来满足需要，如正在研究的所谓光源的“喜爱指数”：首先要确定一些常见物体的喜爱颜色，如人们认为美丽的面部颜色、新鲜肉类食品及蔬菜水果等颜色，并希望通过光源的照明将它们真色变为“喜爱的颜色”。例如国外特制的一种柔白色荧光灯，能压低绝色，加强红色，肉食品在其照射下显得更鲜艳；又如自然荧光灯，可以使人脸色看起来更加红润，健康等。

七、什么叫激光？

激光跟以前介绍的普通光源比有许多不同之处。所谓激光就是光受激辐射放大的简称。它通过辐射的受激发射实现光放大。它的特点是亮度高、单色性好、高度平行的相干光束。它一问世，就引起了人们普遍重视，并很快在生产和科学技术中得到广泛的应用。各种激光器的研制和激光的应用也在突飞猛进地发展着。作为激光器的工作物质已经相当广泛：固体、气体、液体、半导体、染料等。各种激光器发射的谱线分布在一个很宽的波长范围内：短至 0.24 微米以下的紫外，长达 774 微米远红外，中间包括可见光，近红外，红外各个波段；输出功率的峰值，小者只有几微瓦，大者可达 10^{12} 瓦。1. 激光器有几种？

激光器可从不同角度来分类：按其工作物质，可分为气体、液体、固体和半导体激光器等；按其工作方式可分为，连续的、脉冲的、Q 突变与短脉冲的等。

2. 激光有什么特性？

激光的方向性好。因此可用于定位、导向、测距等。如测地球跟月球间的距离，精度可达 $\pm 15\text{cm}$ ；

单色性好。

能量集中。普通光源如白炽灯发出的光射向四面八方，能量分散，即使通过透镜也只能会聚它的一部分光。而激光器发出的激光，由于方向性好，几乎是一束平行光，通过透镜后，可会聚在一个很小的范围内，因此，能量可在空间上高度集中。如果使用脉冲激光器，其能量可集中在极短的时间内，并以脉冲的形式发射出去，即激光又具有能量在时间上高度集中的特性。因为它把能量在时间和空间上能高度集中起来，所

以它具有很大的威力。

相干性好。普通光源的发光过程是自发辐射，所发的光不相干。但激光是受激辐射，故而是相干的，是全息照相需要的理想光源。

3. 激光是怎样产生的？

当一束光射入媒质时，通常同时发生三种过程：光的吸收过程；光的辐射过程；光的放大过程。假设媒质中某原子（或粒子），最初处于基态（稳定态），当它在光子流的照射下，原子（或粒子）有可能吸收光子的能量，从基态跃迁到激发态（不稳态），这种过程叫做光的吸收过程。发生吸收过程的必要条件是：入射光子的能量必须等于原子的两个能级的能量差。但满足上述条件的原子也未必就一定跃迁，因为这里还有跃迁几率问题。各个能级的跃迁几率差别很大，有的大，有的小，而有些能级的激发甚至是被“禁止”的。所有这些都决定于原子本身的运动规律。

原子吸收外界能量而跃迁到激发态，这个状态是不稳定的。原子在激发态停留的时间非常短，它们会很快地在没有任何外界作用的情况下，自发地辐射出光子束，从激发态返回到基态。这种过程叫做自发辐射。这种辐射的特点是：这种过程跟外界无关，各个原子的辐射都是自发地、独立地进行的，因而各个光子的发射方向和初位相都不相同。同时，由于大量原子所处的激发态不尽相同，可以发射出不同频率的光，所以自发辐射的频率范围很广。这就是普通光源的发光机理。如果在激发态能级上的原子，在它还没发生自发辐射以前，就在外来光子的影响下，引起从高能态向低能态的跃迁，并把两个能级之间的能量差以辐射光子的形式发射出去，这种过程叫做受激辐射——激光。受激辐射发出来的光子与外来光子具有相同的频率、相同的发射方向、相同的偏振态、相同的位相和速率。在受激辐射中，通过一个光子的作用，可以得到两个特征完全相同的光子，这两个光子再去作用其它原子就有可能获得 4 个光子，这种过程如此进行下去，就可能产生大量特征相同的光子（光放大）。

一束光照射媒质时，通常情况下上述三种过程将同时进行着。如果第一种过程占主导地位，光就被吸收（减弱），第二种过程占优势时，就是普通发光；第三种过程为主流时，就产生激光。那么，满足什么条件才能使第三种过程为主流呢？我们可用激活介质的工作模式图来加以说明。如图 1 - 8 所示。

图中所示： E_1 为基态， E_3 和 E_2 为激发态，其中 E_2 为亚稳态，原子在 E_2 上的寿命比在 E_3 的寿命要长得多。用 N_1 、 N_2 、 N_3 表示各态的原子（或粒子）数。在外界能源（电源或光源）的激励下，基态 E_1 上的粒子被抽运到激发态 E_3 上，因此， N_1 在减小。因 E_3 态的原子寿命很短，粒子将通过碰撞很快地以无辐射跃迁的方式转移到亚稳态 E_2 上。由于 E_2 态寿命长，其上就累积了大量粒子，即 N_2 不断增加， N_1 却逐渐减少，以致 N_2 大于 N_1 ，于是就实现了亚稳态 E_2 与基态 E_1 之间的反转分布（一般情况下，处于低能态的粒子数多）。三能级示意图中实线箭头所示的过程为主流，虚线箭头所示则为支流。具有亚稳态的物质如红宝石中的铬离子、氦原子、氖原子、氩原子、钕离子、二氧化碳等粒子，利用这些具有反转分

布的激活介质，就可以制成一台激光放大器（激光光源），当有外来光讯号输入时，其中频率 $\nu = (E_2 - E_1) / h$ 的成分就被放大（ h 为普朗克常数， $E_2 - E_1$ 为两能级间能量差）。

所谓三能级图（或四能级图），并不是激活介质的实际能级图，它们只是对造成反转分布的整个物理过程所作的抽象概括。实际能级图要复杂的多，而且一种激活介质内部，可能同时存在几对特定能级间的反转分布，相应地发射几种波长的激光。如氦氖激光器就可

以发射 6328 \AA （埃）、 $1.15 \mu\text{m}$ （微米）， $3.39 \mu\text{m}$ 等多种波长的激光。又如氩离子 Ar^+ 激光器，能输出很多种波长的光，其中最强的是 4800 \AA （蓝光）和 5145 \AA （绿光），这两个波长目前在激光彩色电视中选为基色。

八、光是怎样传播的呢？

来自光源（或被摄物）的光，在空气跟镜头的分界面上将遵循什么规矩呢？当镜头的光圈调至跟波长可比拟时，将会有什么现象产生呢？这些问题涉及到一些光的传播定律。摄影者掌握了这些定律，就能在摄影中主动地应用它。

1. 什么是反射定律，什么是折射定律？

光射在空气跟镜头的界面上，将分为两部分，如图 1-9 所示。一部分光仍旧在原媒质中传播，但改变了传播方向，形成反射光线；一部分光进入另一种媒质里传播，一般也改变了传播方向，形成折射光线。但光在界面以外的均匀媒质中却都是直线传播的。如果要减少反射部分，增加折射（透射）部分，可在界面上镀上增透膜。根据反射定律和折射定律，可具体确定光的反射方向和折射方向。为此，如上图所示，设 n_1 和 n_2 分别为两种介质的折射率， α 为入射角， β 为反射角， γ 为折射角， NN' 为法线。

什么是反射定律？

反射线在入射线跟法线所决定的平面（叫入射面）里，反射线和入射线分居在法线的两侧，且反射角等于入射角。

什么是折射定律？

折射线在入射线和法线所决定的平面里，折射线和入射线分居在法线的两侧，不管入射角如何改变，入射角的正弦跟折射角的正弦比，对给定的两种媒质而言是一个常数，即满足 $\sin \alpha / \sin \gamma = n_2 / n_1$ ；某种媒质的折射率等于光在真空中的传播速度（ c ）跟在媒质中的传播速度

（ v ）之比，即 $n_2 = \frac{c}{v}$ ； $n_1 = c / v_1$ ； $n_2 = c / v_2$ 所以 $\sin \alpha / \sin \beta = v_1 / v_2$ ， $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。折射率大的媒质称为光密媒质，反之称为光疏媒质。

什么叫全反射？

光由光密媒质进入光疏媒质时，全部被反回的现象叫全反射。因为光从光密媒质进入光疏媒质时，折射角总是大于入射角。当折射角等于 90° 时（折射光沿界面传播时），对应的入射角叫临界角。当入射角等

于或大于临界角时就发生全反射（折射光全部消失）。

什么叫漫反射和漫折射？

当界面呈凹凸不平时，我们可以把界面分割成许多小面积元（近似为小平面对），光到达角一小面积元上仍遵循反射和折射定理，只是小面积元的法线方向不尽相同，因此，各折射和反射光的方向也不同，故我们才能从不同的方向看到物体。

2. 什么叫做光的干涉，什么叫光的衍射？干涉和衍射是一切波的基本属性。光能够干涉和衍射，说明光具有波动性。

什么叫做光的干涉？

当阳光照在肥皂泡上时，我们就会看到美丽的彩色；雨天观察路面上油滴的斑点也如此；如果在光路上放置一个有色薄玻璃片（或薄膜），在后面的屏上呈现的图案是亮暗相间的单色条纹。这些都是光的干涉现象。

在什么条件下才有干涉现象发生呢？只有频率相同，振动方向相同，相位（即振动状态）差恒定的两列（或多列）光波相遇才能有干涉现象出现。如前面提到的肥皂泡、油滴、薄玻璃片等都是薄膜，如示意图（1-10）所示。从S发出的光线以入射角*i*射到薄膜上，在其表面上任一点B处，入射光线*b*经反射后成为*b*₁。另一入射光线*a*在A点经折射后进入薄膜内，再在C点经反射后到B点，最后折入原媒质中成为*a*₁。这两条反射光线*a*₁和*b*₁，来自同一点光源S，满足相干条件，进入人眼聚焦于视网膜上，将有一定的光程（等于在媒质中的几何路程跟媒质折射率之积）差。当这光程差是半波长的偶数倍或奇数倍时，可以看到B处出现亮点或暗点，如果是扩展光源则可看到多个亮点或多个暗点（明暗相间条纹）。如果入射光是单色光，薄膜表面上将出现明暗相间的干涉条纹，如果是复色光，就出现彩色条纹。所以阳光照射在薄膜上，所见的彩色条纹是扩展复色光源所产生的干涉现象。为什么强调必须是薄膜呢？因为薄膜比较厚，通过参考点B的*a*₁和*b*₁的光程差就要大，当*b*₁已通过了，*a*₁尚未到达，则两相应波列之间没有重叠，故不能产生干涉现象。为什么在两盏灯的照射下（那怕是它们的强度形状和大小完全相同），观察不到干涉现象呢？因为普通光源发出的光波是由彼此独立，互不相关的原子发出的一系列有限长的波列组成。不屑说不同原子，就是同一原子先后发出的两个波列之间的位相差（位相差 = 光程差 / $\lambda \cdot 2\pi$ ）也是不固定的，而是随时间作无规则且迅速的变化，由于这种变化引起的光强度改变的次数，在观察或测量的时间内几乎是无限多的，于是在相遇点只能获得平均光强度。它跟两个波列在该点单独产生的光强度之和没有区别，故不产生干涉现象。光的干涉现象在科学技术中有很多应用，在摄影技术中也有应用。例如折射型摄影镜头中的镜片一般都镀有增透膜就是利用薄膜表面反射时，使某些波长因干涉而减弱，以减少某种波长的光的反射，而增加透射。用镀反射膜（薄膜表面反射时，使某些波长干涉而加强）来增加反射率；象氦氖激光器中的谐振腔反射镜要求对波长 $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ 的反射率在 99% 以上，为此可以采用高层镀膜，一般镀到 13 层、15 层或 17 层。全息照相的记录就是光的干涉原理具体应用之一；采用多层涂膜可以制成透射的干涉滤色片，就是使某一

特定波长的单色光能透过滤色片，而其它波长的光则因干涉而抵消掉，同样可制成反射式滤色片。

什么叫光的衍射？

首先让我们观察一下如图 1 - 10(b)所示的实验：S 是一点光源，K 为直径可调节的圆孔，E 为屏幕。可观察到，随圆孔的缩小，屏上的亮圆也随之缩小，当小孔的直径小到跟波长（400 ~ 7700 埃）可以相比拟时，屏上便得到一些明暗相间的圆环，这些圆环所占的范围远远超过了根据光的直线传播所照明的面积（如图中 a b 范围）。光的这种绕射现象叫做光的衍射。如果把小孔换成小屏，窄缝和细丝等同样会观察到光的绕射现象（明暗相间的圆环或明暗相间的条纹）。以上是在单色光照射下的情形。如果光源是复合光（日光），则会观察到彩色圆环或彩色条纹。摄影镜头及其它光学仪器的分辨本领就是由光的衍射性质决定的；全息照相的再现也是靠光的衍射来实现的。

3. 什么叫全息照相？

我们之所以能看到物体，是因为物体上的各点发出的光（或反射、折射的光）作为一种信号，被人的眼睛接收，并引起感觉的结果。这种光信号是一种电磁波，借助于物体上各点发出电磁波的频率、振幅、以及相位的不同，人们可以区别物体的颜色、形状、远近等。普通照相是通过镜头把物体在感光胶平面上的照度分布记录下来，所以记录的只是光信号的强度，印制在相纸上呈现出物体的平面象。所谓“全息照相”就是要把物体上发出的光信号的全部信息，包括光波的振幅和位相全部记录下来，其中相位表示光传播中各质点振动状态。因此在被摄物体再现时，能得到物体的立体图象。早在 1948 年伽伯就提出了全息原理，并开始了全息照相的研究工作，但进展很慢，直到激光问世，才促进全息技术进入了一个新阶段，相继出现了多种全息方法，不断开辟了全息应用的许多新领域。伽伯因此获得 1971 年度的诺贝尔物理金奖。

激光全息照相是怎样记录的呢？

图 1 - 11(a)所示为全息照相记录的一种实验装置。激光器射出激光束通过分光镜分成两束：一束经透镜扩束后照射被摄物体，再经物体反射（或透射）后照到感光底片上，这部分光叫做“物光”；另一束经反射镜改变光路，再由透镜扩大后直接投射到感光底片上，这部分光叫参考光。由于激光相干性好，物光和参考光在感光片上迭加，形成干涉条纹。因为从被摄物体上各点反射（或折射）出来的物光，其强度和位相都不相同，所以感光片上各处的干涉条纹也不相同，强度不同使条纹变黑程度不同，位相不同使条纹的密度、形状不同。因此，被摄物体反射光中全部信息是以干涉条纹的形式记录在感光片上的，经显影、定影，就得到全息照片。全息图就是一张干涉花样图，它跟普通照相底片不同，用肉眼观察它，只见它是张灰蒙蒙的片子，看不到被摄物体的任何形象。在显微镜下可观察到它上面布满细密的亮暗条纹，这些条纹形状与原物形象也没有任何几何上的相似性，必须用激光去照射全息图才能再现像原物似的立体形象。

全息照相是怎样再现的？

如图 1 - 11(b)所示，用一束同参考光束的波长和传播方向完全相同的激光光束照射全息图时，则用眼睛可以观察到一幅非常逼真的原物形

象，悬空地再现在全息图后面原来物体的位置。全息图如同一窗口，当人们移动眼睛从不同角度观察时，就好像面对原物一样看到它的不同侧面的形象，甚至在某一个角度被物体遮住的东西也可以从另一个角度上看到它。可见全息图再现的是一幅逼真的立体图象。如果挡住全息图的一部分，只露出另一部分，这时再现的物体形象仍然是完整的，并不残缺。因此，即使它碎了，拿来其中一片仍可使原物再现。

在再现过程中，布满干涉条纹的全息图，相当一块复杂的光栅，照明光束通过这个“光栅”产生衍射，产生了复杂的衍射场，其中包含原物的波前，人们在全息图前面看到的就是这个再现波前所产生的虚像。除了这个虚像之外，在全息照片的观察者一侧会形成一个实像，跟原物对称的分居在底片的两侧。

普通照相跟全息照相有什么区别？

普通照相是以几何光学为基础的，底片上只记录物体各点的光强(或振幅)，物像是点对点对应的，得到二维平面图，只用普通光源即可。

全息照相，其过程分记录和再现两步，是以干涉、衍射等波动光学的规律为基础的，底片上记录的是物体各点的全部信息(振幅和位相)，物像是点对应关系，即每个物点所发射的光束直接布满整个底片；也就是说，全息图中每一局部都包含了物体各点光的信息，如图 1-12(a)和 1-12(b)所示。所以通过全息照片的一片碎片仍能看到整个记录的全部图像。总之，全息照相记录的是物光和参考光的干涉花样，其中记录了两光波之间的位相差，它是通过参考光把物光的全部信息(振幅和位相分布)记录下来的。假如没有参考光，或参考光同物光不能相干，也就无法把位相记录下来。再现时，必须用与原来参考光相同的光束(再现光)去照射。对再现光而言，全息照片相当于一块透射率不均匀的障碍物，再现光经过时就要发生衍射，观察到的是一幅逼真的立体图像。要求光源有很高的空间和时间的相干性，激光便能满足要求。

全息术有哪些应用？

全息照相有很多优点，可能应用的范围很广，潜力很大，现在多数还处于试验阶段，有如下几种可能应用：(a)全息电影和全息电视；(b)全息显微技术；(c)全息干涉技术；(d)红外、微波及超声波全息照相技术，其全息照相能提供军事目标的立体形象，对于识别飞机、导弹、舰艇等有很大作用。光在大气及水中传播时衰减很快，甚至在不良气候条件下无法工作。但用红外、微波及超声波拍摄全息照片，然后用可见光再现物像。这种全息技术跟可见光全息技术相同，技术上需要高灵敏的记录介质和适当的再现方法。超声全息照相可以用于水下侦察和监视。对可见光而言不透明的物体，往往对超声波都是“透明”的，超声全息照相也能用于医疗透视诊断，在工业上可作无损探伤；(e)全息存储技术，全息照相有很大的存储量，在一张全息图上可以存储许多全息图。利用角度选择性可以依次读出不同信息。目前制成的全息照相存储器，可在 1cm^2 的胶片上存储 10^7 个信息，比目前使用的存储器的存储量要高十倍至百倍。

4. 什么叫做光的偏振？

如果光波在一个固定平面内只沿一个固定的方向作振动，这种光称为线偏振光或面偏振光(简称偏振光)。一个原子或分子在某一瞬时所

发的光原本是偏振的，即振动具有一定的方向。但光源中大量原子或分子所发出的光是间歇的，一个“熄灭”，另一个“燃烧”，在接替时，光的振动不可能保持一定的方向，而是以极快的小规则的次序，取所有可能的方向，而且各方向都是机会均等的，没有一个方向较其它方向更占优势，这种光叫做自然光。普通光源发射的光就是自然光，而激光却是偏振光。

怎样用图示法表示自然光和偏振光呢？图 1 - 13 所示是通常用的表示自然光的方法：(a)表示跟光传播方向垂直的任意平面内，光振动是沿各个方向分布的，且所有方向的振动强度都相同；(b)在上述平面内，把各个方向的振动都分解为两个互相垂直的分振动，则自然光可用互相垂直且振幅相等的两个独立光振动表示；(c)表示自然光在跟光的传播方向垂直的不同平面的分布情况，点表示垂直纸面的光振动，短线表示在纸面内的光振动，点和短线相同，且距离相等表示为自然光。图 1 - 14 表示偏振光和部分偏振光：(a)表示振动方向在纸面内的线偏振光；(b)表示在垂直纸面振动的偏振光；(c)表示在纸面内的振动强于垂直纸面内振动的部分偏振光；(d)表示垂直纸面振动强于平行纸面振动的部分偏振光。

自然光怎样转化为偏振光呢？

光照射到物体表面时，一部分被反射，一部分被折射。实验指出，在自然光被某些物体反射和折射过程中，这些物体能够使某些方向的振动较其它方向的振动占优势，于是在反射或折射出来的光线中，某一方向的振动特别强，而其它方向的振动特别弱，如图 1 - 15 所示是入射角为任意角度的入射光线（自然光），其相应的反射光和折射光都变成了部分偏振光的情况，反射光中垂直于入射面振动的光较强，而折射光中平行于入射面振动的光强。布斯特在 1811 年指出，反射光偏振程度决定于入射角 α ，当 α 等于某一特定值 α_0 并满足 $\text{tga}_0 = n$ ， $n = n_2 / n_1$ 时，反射光则成为完全偏振光，经推导得 $\alpha_0 + \theta = 90^\circ$ 即反射光和折射光相互垂直。如图(b)所示。反射光为偏振光， α_0 角叫做布斯特角。

折射光的偏振化程度也决定于入射角和折射率。在折射率给定的条件下，当 $\text{tga}_0 = n$ 时，则折射光偏振化程度最强，但还远不是偏振光。如果将自然光连续地通过许多平行玻璃后（即玻璃堆），则折射光偏振化程度可以逐渐增强。当玻璃片的数足够多时，最后透射出来的光将成为完全偏振光。

什么叫偏振镜（偏振片）？

偏振镜是一种只能让一个振动方向的光通过的中性滤光镜。它是起偏器（自然光通过它可变成偏振光）或检偏器（检验光是否是偏振光）中应用最广的一种。偏振镜为什么只能让一个振动方向的光通过呢？这是由它的结构决定的。它是用赛璐珞或其它透明物质构成的薄片，在薄片的表面上涂了一薄层约 0.1mm 二向色性很强的物质的细微晶体（奎宁或硫酸金鸡钠碱是这种物质中最常用的）。有些晶体对不同振动方向的光具有选择吸收的性质。例如电气石晶体是六角形的片状如图 1 - 16 所示，长对角线的方向称为它的光轴。当光射在这种晶体表面时，跟光轴平行的成份被吸收的少，通过的多，如图(a)所示；跟光轴垂直成份被吸

收的多，通过的少，如图(b)所示。这种性质叫做二向色性，上例中晶体对两个方向的振动吸收差别不够大，也即二向色性不强，用作偏振片的理想晶体最好能尽量使一个方向的振动全部被吸收，即二向色性强。例如，硫酸碘奎宁晶体的性能就比电气石好，但它的晶体很小。通常的偏振片只是在拉伸了的塞璐珞基片上蒸镀一层硫酸碘奎宁的晶粒，基片的应力可以使晶粒的光轴定向排列起来，这样可得到面积很大的偏振片。偏振片上能透光的振动方向叫做它的透振方向。如果将偏振片夹在两层粘合玻璃中间就成为偏振镜。

自然光通过偏振片后就可以转变为偏振光，如图 1 - 17 所示。当偏振光的振动方向与偏振片的透振方向（透光轴，即偏振化方向）相同时，光能通过；当偏振光的振动方向跟偏振片的透振方向垂直时，光不能通过（产生消光）。例如在拍摄水面下的某物或展览橱窗中的陈列品的照片时，由于水面或橱窗玻璃的反射很强，使得水面下的景物或橱窗中的陈列品看不清楚，摄出的照片就模糊不清。如果在照相机镜头上加一个偏振片，并使它的透振方向平行于入射面，它也跟反光的平面垂直或斜交，使反射光中的成分多的垂直于入射面振动的反射光被阻挡，就能摄得清晰的照片。

5. 什么叫大气散射？

光线通过均匀媒质（如玻璃、清水等）时，从侧面是难以看到光线的，如果媒质不均匀（如有悬浮微粒的浑浊液体），我们便可以从侧面清晰地看到光束的轨迹。因为媒质不均匀性可使光线向四面八方散射。大气中的分子因热运动其密度有涨落（可看成是小团块）。当大气中的这些团块的尺度远大于波长的数量级时，散射可看成光在这些团块上的反射和折射；其尺度与波长可比拟时，散射则可看做是小团块对光的衍射作用。即大气的散射实质是光向四面八方反射，折射或衍射的结果。用大气散射的理论可以解释为什么天空是蓝的，旭日和夕阳为什么是红的，云为什么是白的等等。

白昼的天空所以是亮的，完全是大气散射阳光的结果。若没大气，就不会有白昼，人们仰望天空，将会看到光辉夺目的太阳悬挂在漆黑的背景中，正像宇航员常见的景象。由于大气的散射，将阳光从四面八方射向观察者，我们才能看到明亮的天空。

因为团块散射光的强度跟波长的四次方成反比（即 $I_a \frac{1}{\lambda^4}$ ），故

波长较短的蓝紫光比波长较长的（红、黄）光富集而使天空呈蔚蓝色且明亮；大气的散射一部分来自悬浮的尘埃，而大部分是分子密度涨落引起的分子散射。尤其是每当大雨初霁，玉宇澄清，万里无云时，天空总是蓝得美丽动人，这是因为波长四次方反比作用在这种情况下更加明显的缘故。

旭日和夕阳呈红色，实际跟天空呈蓝色的原理一样，蓝光仍然比红光散射强烈，只不过射向地面的部分少了，大部分射向北离地面的方向（认为是散射掉了），在直射的阳光中长波长的红光剩余的相对较多，如图 1—18 所示，早晚从太阳直射的光所穿过大气层的厚度，比正午时直接由太阳射来的光所穿过大气层厚度大得多，所以被散射掉的蓝光成分大于红光成分，故太阳呈现出红色。

白云是由大气中的水滴组成的，因为这些水滴的半径跟光波波长比，不算小了，此种情况下散射光的强度不再跟波长的四次方成反比了，而是跟波长的关系不大，也就是说各种不同波长的光（可见光），其散射强度相差不悬殊，它是由各种波长的光组合的复色光（白光），我们才看到云是白色的。由于薄雾散射，用红色滤光片加在照相机镜头前拍摄薄雾中的景物，可以得到清晰的照片。但在浓雾情况下，还用红色滤光片，反而降低了照片的清晰度。

至此，我们知道：大气的散射可看做是大气（团块）对阳光向四面八方反射、折射或衍射作用的结果；当入射角等于布儒斯特角 a_0 （即反射光与入射光垂直）时。其反射光为线偏振光。因此，我们就不难理解下边各种情况：来自天空中跟阳光投射方向成直角方位的天空散射光，具有偏振光的性能，而在其临近天空具有部分偏振光性能。特别是在天空愈蓝愈清澈、洁净、干燥，上述偏振光偏振化程度愈显著。所以，早晚时南北天空和天顶的蓝色天空的天光，基本为偏振光。但是，若是上述天空被云层遮蔽，以至蓝天变得浑浊灰白时，散射光即失去其偏振性；哪怕是正午来自地平线的天光，也会因微尘遍布，空气浑浊或穿过稠密的空气层而失去偏振性。

摄影中有时需要偏振光，但必须得消除或避免有害的偏振光。可以用偏振镜等仪器获得或消除偏振光；灵活运用天光的投射方向同样可以获得或消除偏振光。

6. 光有哪些效应？

光在传播过程中遵循一些规律，如：有线传播、反射、折射、干涉、衍射、偏振、散射等。光在跟物体相作用时还会产生许多效应，如：光化、光热、光电、光的机械效应等。客观光度法就是用各种检测仪器代替眼睛来测光度学量。各种检测器就是分别利用不同的光效应原理制成的，光对眼睛，对胶片的作用都是光化作用；物体在吸收光时分发热，这属于光热效应，这是个即普通又普遍的物理现象，根据这种现象可以发现和测量光的能量；金属表面受到光的照射而失掉电子的现象就叫做光电效应，光电管就是利用这种原理制成的；光电效应还表现出光压作用，把物体做成轻而易动的翼状，光照射翼片时，它就会转动。

我们了解了光与色的关系，光传播时所遵循的基本规律，光跟物质作用时产生的效应等。显然，生命是离不开光的，摄影工作者们离开光更是寸步难行。那么光到底是什么？

7. 光的本质是什么？

对光本质的认识是随着新知识与新事实的积累而改变和逐步深化的，下面简要介绍一下关于光本质的几种学说。微粒说的内容是什么？

它认为光是粒子流，它直接说明了光的直线传播定律，对光的反射和折射能作一定的解释。但用其研究光的折射定律时，就会得出光在水中的速度比在空气中的速度还要大的错误结论。

波动说的内容是什么？

它认为光是在弹性媒质中传播的机械波，这种学说能解释光的干涉、衍射现象，但不能解释光电效应。

电磁说的内容是什么？

此理论认为光也是电磁波，并由后来的实验所证实。光波在电磁中

居波长较短的区域。光在真空中传播速度为 $3 \times 10^8 \text{m/s}$ ，用 c 、 ν 、 λ 分别表示光速、频率和波长，则 $c = \lambda \nu$ 。这种理论仍不能解释光跟物质作用时的能量转换问题。

以上几种理论叫做经典理论，虽然都有很大的局限性，但它们在力所能及的范围内，不失简单、准确的特点，所以现在仍然被广泛的应用着。例如，关于摄影镜头的成像问题，涉及最多的是几何光学方面的知识，经典理论对于光电效应，光的发射及吸收时能量转换问题是无能为力的，这在客观上就促进了新的理论的产生和发展——量子论和相对论等现代理论的出现。

量子假说的内容是什么？

这种理论认为，各种频率的电磁波（含光波），只能象粒子似地以一定最小份额的能量发生，这种粒子叫做“量子”，其能量正比于频率，这是光的发射问题。另外还有光的吸收问题如光电效应。实验证明，在光照射下，金属表面可逸出电子，逸出电子的能量跟光的强度无关，但与频率有关。

爱因斯坦的假说内容是什么？

爱因斯坦发展了光的量子理论，提出如下假说：当光跟物质相互作用时，其能量并不像波动理论认为的那样，是连续分布的。此假说认为上述能流是集中在一些叫做光子（或光量子）的粒子上，但对这种粒子仍保持着频率及波长的概念。光子的能量正比于其频率 即 $E = h\nu$ ， E 表示光子能量， h 为普朗克常数。

总之，到目前为止，还没有建立起来一个更完整，更深入地反映光的本性的统一的学说。

为什么说光是物质的一种形式？

我们知道光有一定的传播速度，因此，说明它有一能量和动量。根据相对论的质能关系，光必然也有质量。其表示式为：能量 $E = mc^2$ 动量 $P = mc$ （对反射面施以压力）， c 为光速， m 为光子质量。因为光有质量，它必然有吸引别的物体的本领，故可推断它有重量（已被证实）。因为光有：质量、重量、传播速度，并能传递能量和动量等物质所具备的特征。因此说光也是物质的一种形式，但它又不同于一般物质。

光这种物质的特殊性是什么呢？普通物质无论是处于运动或静止状态，都具有一定的质量。而光的静止质量为“零”。简单说明如下，按照相对论基本公式： $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$ ， m 为以速度 v 运动的粒子质量， c 是光在真空中传播速度， m_0 为粒子静止时质量。对光而言光子的传播速度就是光速即上式中的 $v = c$ 。当 $m_0 = 0$ 时，那么， $E = mc^2$ ， $p = E / c$ 也必然为零。这就说明，若光的静止质量为零时，光根本就不存在了，也就是光被物质吸收了，这时物体发热或物质的内能以其他形式增大，如使物质的原子（或分子）变成激发态（从基态变到激发态），因而使这些原子（或分子）有了发射光或加入化合反应的本领，也就是光能转变成了其他形式的能。动量（或冲量）变为零，说明光子的动量（或冲量）传递或转让给被光作用的物质了，这意味着物质的原子、分子、或由它们组成的物体获得了推力（压力），例如光的机械效应实验。

现代核物理学又发现一种特殊的现象。在原子核作用范围内，随着

光量子的消失，而产生一对电子——电子和正电子（电子对），正电子的质量跟电子质量相等，电量也相等，但符号相反，而原子核不变。已经证明这个电子对不是从光作用的物质的原子核中产生的。那么它就是由光量子转变而产生的（从光中产生）。也发现一种相反的变化，这个电子对一经结合，它们的电荷就互相中和而成为不带电的粒子，这粒子的质量、能量、传播速度跟光子相同，也就是说电子对转变为两个光子飞散出去。这种光子的频率比可见光的频率大一百万倍，所以它属于伦琴射线（或 γ 射线）区。

第二章 摄影中必须掌握的物理知识

第一节 摄影镜头成像中涉及到哪些基本概念

一、成像有几种情况？

成像离不开点、线、面，即点构成线，线构成面，面构成体。所以成像也必须从点、线、面谈起。

1. 什么叫点光源？

点光源是成像的基本因素。无限个发光点的像方能组成完整的像。在光学中把一个发光（或散射光的点叫做一个点光源。如果一个物体对人眼所张的视角为 1 时，则观察者所看到的物体就象一个点了。一个实际上的光源或被摄物体可以是由无限多个发光点组成的。画光路图时只选几个特殊点就足够了。

2. 什么叫光线？

光线可分为物理光线（有直径有体积）和几何光线（无直径无体积）。

物理光线：光从一个由两个光孔限制的细长空间（叫光管）中通过，若光管的截面跟其长度比可以忽略时，这样的光管叫做物理光线。物理实验中用的就是这种光线。几何光线：几何光学中，画光路图的光线，认为是无直径、无体积的纯几何线。利用几何光学中的点光源和光线的概念可以把复杂的能量传输和光学成像问题转化为简单的几何运算问题。

3. 什么叫波面？

光是电磁波，光波就是电磁波振动的传播，在光波传播的空间（波场）中，振动相位相同的点在某一时刻所构成的曲面称为波面。在各向同性媒质中，光沿着波面法线传播。因此，通常说的几何光线实际指的就是波面的法线；跟波面对应的法线束就是通常说的光束。可以认为光束是光能的载体，在同一波面上通过的光束愈宽，其所携带的光能就愈多。

4. 什么叫单心光束？

单心光束（同心光束），就是各光线（或反向延长线）交于同一点的光束。例如点光源的光线就是同心光束。如图 2 - 1 所示的四种情况中，通过 S 或 S' 的光束都是同心光束，是几何光学中理想成像的几种形式。

5. 什么叫实像和虚像？什么叫实物和虚物？

如图 2 - 1 所示，一个以 S 点为中心的同心光束经光具组（可以是透镜组，也可以是透镜跟面镜的组合等等）折射（或反射）后，转化为另一个以 S' 点为中心的同心光束，我们就说光具组使 S 成像于 S'。S 为物点，S' 则为像点。若出射光束是会聚的（交于 S' 点），则 S' 为实像，如图(a)和(c)所示的 S' 就是实像；若出射同心光束是发散的，则把像 S'（反向延长线交点）叫做虚像，如图(b)与图(d)所示的 S' 就是虚像。不仅像有实虚之分，物也有实虚之别。

如果入射光束对某个光具组而言，是发散的同心光束，则相应的发散中心 S 称做实物，如图(a)及(b)所示的 S 都为实物；如果入射的是会

聚的同心光束，则相应的会聚中心 S 称虚物，如图 (c) 及 (d) 中所示的 S 为虚物。当然，来自真实发光点的光束，不可能是会聚的。虚物常出现在光具组联合成像的问题中。如一个光具组出射的是会聚光束，在会聚前就遇到了另一个光具组，那么，原来的那个会聚中心就是后一个光具组的虚物。图 2 - 2 所示，是一种变焦镜头的前固定组 L_1 ，变倍组 L_2 两部分的示意图。被摄物体在无穷远，其主光轴上点 S 的光束可以认为是平行的，其像点 S' 可会聚于 L_1 的后焦点上， S 对 L_2 而言就是虚物点。

综上所述，物与像有四种情况：实物成实像、实物成虚像，虚物成实像和虚物成虚像。分别如图 2 - 1(a)、(b)、(c)、(d) 所示。

6. 什么叫物空间？什么叫像空间？

一个能使任何同心光束保持同心性的光具组，叫做理想光具组。理想光具组将空间每个物点 S 和相应的像点 S' 组成一一对应关系。由物点组成的空间叫做物空间，由像点组成的空间是像空间。由于物和像都有虚实之分，所以物空间和像空间有时是重叠的。若具体指出空间某一点是属于物空间还是像空间，不能片面地由它跟光具组的相对位置（居左还是在右来判断，而是要看它是跟入射光束还是跟出射光束相联系，跟入射光束相联系的为物空间，跟出射光束相联系的为像空间。

二、球面为什么是摄影镜头的最基本元件？

通常的摄影镜头都是由透镜组组成的。每个透镜都是由两个球面组成。物体通过镜头成像，实际是通过每个球面逐次成像的，最后球面成的像就是镜头成的像。因此，我们要首先研究球面成像规律。

1. 什么叫符号法则？

研究物像的关系，就要遇到物距和像距的正负和物和像的倒正等符号问题。我们仅介绍新笛卡儿符号法则，以单球面为例具体说明如下。

图 2 - 3 中， AOB 表示球面的一部分，中心 O 叫做顶点，其球心 C 叫做曲率中心，其半径叫做曲率半径，连接顶点和曲率中心的直线 CO 叫做主光轴（或主轴），通过主轴的截面叫主截面。主截面是对主轴对称的。所以我们只需讨论一个主截面内的光路就足见一般了。在计算一条光线的线段长度和角度时对符号规定如下：

光线跟主轴交点的位置都从顶点算起，在顶点右方的其间距的数值为正；凡在顶点左方的，其间距的数值为负。物点或像点至主轴的距离，在主轴上方都为正，居下方者为负。

光线方向的倾角都从主轴（或球面法线即曲率半径）算起，并取小于 $\pi/2$ 的角度。从主轴或法线转向有关光线时，规定顺时针方向转动时的角度为正；逆时针转时其值为负，考虑角度符号时，不必考虑组成角度两线段的符号。

在图中的长度和角度（几何量）只用正值。例如以 S 表示某线段是负的，应加以负号即 $-S$ 时才能表示该线段的几何量，角度也如此，如图 2 - 3 所示的几何量（绝对值）。

图中 U 及 U' 分别叫物方孔径角和像方孔径角； S 和 S' 分别叫物方截距（物距）和像方截距（像距）。

2. 球面折射成像有什么规律？

如图 2-3 中，对 PAC 和 P'AC 应用正弦定理，并应用折射定律可导出物像关系式如下：

$$S' = r + \frac{n \sin(-u)}{n' \sin u'} (r - S) \quad (2-1)$$

r 为球面曲率半径， n 和 n' 分别表示物方和像方折射率。由上式可知：当 n 、 n' 、 r 给定时， S 跟 S' 不是一一对应的，也就是说物距一定的 P 点其像 P' 点的位置不是唯一的（即 S' 值不是固定的）， S' 是随孔径角的变化而不同，这就是轴上物点产生球差的原因所在。理论上证明，只有个别共轭点（P 与 p'）是一一对应的，如齐明点的像与物共轭。为使问题简化，令孔径角很小，即研究近轴区域内物像关系（近轴光学或高斯光学）。

3. 近轴光学中球面折射成像有什么规律？

由图 2-3 中所示可知，在近轴条件下，弧 AO 近似为直线，正切近似等于正弦，且两者与角度的弧度值无实际差别。 $\sin(-u) = \overline{OA} / (-S)$ ， $\sin(+u') = \overline{OA} / S'$ 代入普遍式(2-1)中可得到近轴下以特殊形式如下：

$$\frac{n'}{S'} - \frac{n}{S} = \frac{n' - n}{r}$$

由(2-2)式可知，在 n 、 n' 、 r 给定的条件下， S 跟 S' （或 p 与 P' ）是一一对应的，不论 S 值的大小都适用。由于光路的可逆性，物点和像点是可以互换的，物点和像点的这种关系叫做共轭。相应的物点和像点叫共轭点；相应的物线和像线（或入射线及其对应的出射线）叫共轭线；相应的物面跟像面叫做共轭面。

什么叫折射球面的物方焦点和像方焦点？

如果把点光源（或物点）放在主轴上某一点时，其发出的光束折射后成为跟主轴平行的光束，则这个物点就叫球面的物方焦点（或叫第一焦点、前焦点），用字母 F 表示。从球面顶点到物方焦点的距离叫做物方焦距，以 f 表示。由(2-2)式可知，此时 $S = -f$ ， $S' = -nr / (n' - n)$ ， $f = S = -nr / (n' - n)$ 。如图 2-4(a)所示。平行于主轴的入射光束，即(2-2)式中的 $S = \infty$ ，其折射光束跟主轴的交点叫像方焦点（或叫第二焦点），以 F' 表示， OF' 叫像方焦距以 f' 表示，如(2-4)图中的(b)所示。将 $S = \infty$ 代入(2-2)式中，解出 $S' = n' / (n' - n) \cdot r$ ，此时 $f' = S' = n' / (n' - n) \cdot r$ 。在球面折射时， $n \neq n'$ （否则不会发生折射），

故 $|f| \neq |f'|$ ，两者不等。符号相反说明它们分居在球面的两侧。

什么叫光焦度？

由式(2-2)可知，当 r 、 n 、 n' 给定时， $(n' - n) / r$ 是一个表征球面光学特性的常数，叫做该面的光焦度，以 Φ 表示： $\Phi = (n' - n) / r$ 。

什么是高斯公式和牛顿公式？

把球面的物方焦距和像方焦距的数学式代入(2-2)式，便可得到

高斯公式如下：

$$\frac{n'}{f'} - \frac{n}{S} = -\frac{n}{f} \quad (\text{或} \frac{n'}{f'})$$

或
$$\frac{f'}{S'} + \frac{f}{S} = 1$$

其中， $\frac{f'}{S'} + \frac{f}{S} = 1$ 更为常用。

如果以 F 和 F' 为坐标原点，物距和像距分别以它们为起点计算，如图 2-5 所示。其中 $(-x)$ 及 x 分别叫“焦物距”和“焦像距”。显然 $(-s) = (-X) + (-f)$ ； $S = (+f) + (+X)$ 。将

$$xx = ff \quad (2-4)$$

高斯及牛顿两式是几何光学中，物像关系的基本公式。它们不只适用于球面折射成像，也适用于透镜成像及光具组成像。

4. 什么叫共轴光具组逐次成像法？

共轴光具组由两个或两个以上依次排列有共同光轴的透镜组构成，实际就是一组折射面。摄影镜头就是共轴光具组。

图 2-6 所示就是球面逐次成像法示意图。 P_1 为共轴光具组的物点， P_1 、 P_2 、 P_3 及 P_4 分别是通过各球面的像。 P_4 是最后一个球面成的像，也是共轴光具组的像。前一个球面的像恰是后一个球面的物，如 P_1 是第一个球面的像，对第二个球面而言，它却是物，此时第一个球面的像空间跟第二个球面的物空间重叠。第一个球面是实物成实像；第二个球面是实物成虚像；第三个球面是实物成实像；第四个球面是虚物（会聚光束）成实像。入射光束是发散的称为实物，入射光束是会聚的称为虚物；出射光束为会聚的称为实像，出射光束为发散的称为虚像。

逐次成像法求像的方法：作图法可根据折射定律，求出折射角，其出射线的方向就算知道，两条出射线的交点或出射线延长线的交点就是所求的像点；或者用典型光线画光路图，跟透镜的典型光线类同（后边介绍）；代数法，利用高斯公式或牛顿公式计算出像距或焦像距，就可在轴上标出像点位置。在近轴光线情况下，对任何共轴光具组都适用。只要掌握前一球面的像是后一球面的物的原则，就可以逐次画出或计算出最后一个球面的像，即共轴光具组的像。

5. 什么叫共轭面？

普通摄影实际是照相物镜（镜头）使空间物体在某一平面上的投影（后边介绍）或使某一平面上的物成实像于感光板上。单球面是镜头的基本成像元件，我们仍然以球面折射成像为例。如果我们将图 2-3 绕球心 C 顺时针转过任意小角度，则 P 和 P' 分别转到 P_1 和 P_1' 的位置，由于球对称性， P_1 和 P_1' 必然是共轭的，如图 2-7 所示，就是轴外物点成像的情形。<

PP_1 和 $P'P_1'$ 分别是以 C 为中心的两个球面上的弧，在 ϕ 很小的条件下，它们都可以近似为光轴的垂线，而那两个曲面（球面的一部分）则可以认为是跟光轴垂直的小平面分别以 σ 和 σ_1 表示。如果使 ϕ 为不同值时，就会有不同的共轭点对应，也就是说 σ 上的所有点，在 σ_1 上都有各自的

共轭点与之对应。这样一对由共轭点组成的平面（或曲面）叫共轭面。

同理， $P_1'P_1'$ 就是 PP_1 的共轭线。

6. 怎样画球面折射线成像的光路图？

在近轴成像条件下，物点与其共轭的像点是一一对应关系，也就是说以物点为顶点的入射光束中的任何光线，经球面折射后的出射光线，都在以像点为顶点的光束之列。因此，我们只选其三条特殊光线中任意两条即可画出光路图。如图 2-8 所示：(a) 物空间平行于主光轴的光线，折射后通过像空间主焦点 F' ，如图中光线 1 ；(b) 物空间通过主焦点 F 的光线，折射后在像空间平行于主光轴，如图中光线 2 ；(c) 通过球面曲率中心（光心）的光线方向不变，如图中光线 3 。作图时，只要采用三条特殊光线中的任意两条即可。否则，只有用折射定律才能确定出射线（折射线）的方向。

7. 什么叫横向放大率？什么叫角放大率？

与前述图解法具有同等意义的还有所谓的解析法。就是首先用高斯公式或牛顿公式求得像距 S' 或焦距 x' ，然后用由折射定律导出的其它公式来计算共轭线或共轭点间的各种几何上的比例关系。如横向放大率和角放大率。

横向（或垂轴）放大率的定义为：垂直于主轴的像长跟物长之比。如用 β 表示横向放大率，如图 2-9 所示，则 $\beta = y'/y$ ，由折射定律， $\sin i / \sin i' = n'/n$ ，由图所示，显然， $\sin i = y/(-S)$ ， $\sin i' = -y'/S'$ （因为是近轴），故

$$\beta = \frac{S'}{S} \cdot \frac{n}{n'}$$

$$\text{或 } \beta = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f'} \quad (2-5)$$

由图 2-8 中的 S 、 S' 跟 x 、 x' 的关系决定 $\beta = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f'}$ 。为正，

表示像是正立的（对物而言），为负表示像是倒立的； $|\beta| < 1$ ， $|\beta| = 1$ ，

分别表示像是缩小的，跟物等大的或比物大的情形。由 (2-5) 式可知，对于给定的一对共轭平面，横向放大率是与 y 与 y' 有关的常数，这就保证了共轭面的几何相似。例如对于航测的或翻拍的摄影镜头所成的像必须要严格的跟物相似。由图 2-9 可知： $h/S' = \tan u' = u'/u$ ， $h/s = \tan u = u$ ，故 $S'/S = u/u'$ ，所以式 (2-5) 变为：

$$\beta = \frac{S'n}{Sn'} = \frac{un}{u'n'} = \frac{y'}{y}$$

即 $nuy = n'u'y'$ (2-6)

(2-6) 式表明：光线在球面折射的情况下，物方折射率、物高及孔径角三者之积等于像方折射率、像高及像方孔径角三者之积，其中 u 和 u' 是共轭的。上述三者之积叫做拉氏不变量，(2-6) 式叫拉氏不变式。其中 y 、 y' 受到近轴物点的限制， u 及 u' 受到近轴光线的限制。凡物点不在主轴上而能理想成像，都必须满足此式。

什么叫角放大率？

表示任一条入射光线及其共轭的出射光线跟主轴的夹角之比。如图 2-9 中的两对共轭光线的角放大率分别为 u' / u 和 i' / i 。若以 β 表示角放大率，则

$$\beta = \frac{u'}{u} \quad (2-7)$$

故
$$\beta = \frac{n}{n'} \quad (2-8)$$

由 (2-8) 式可见，对于给定的光具组， β 是个常数，这就限制了光具组改变光束的自由。例如一个摄影镜头，要想得到较大的像，光束的孔径角就得相应的小，通过镜头的光通量也相应的少。要想在 β 一定时，只改变横向放大率是不可能实现的。

第二节 什么叫透镜

透镜通常是用透明物质（如玻璃、石英、岩盐）制成。透镜的表面也可以是复杂的形式，如柱面、抛物面等。但大多数两个表面都是球面或有一个面是平面。凡中间部分比边缘部分厚的

透镜都叫凸透镜，常以 \uparrow 在图中表示；中间部分比边缘部分薄的透镜叫凹透镜，在画光路图时常以 \times 表示。常见的透镜如图2-10所示。连接两球面曲率中心的直线称为透镜的主轴，如图2-11所示为各种透镜的主轴的情形。透镜通常制成圆形，且以主轴为对称轴。透镜大都磨成薄片，圆片的直径叫做透镜的孔径。物点在主轴上时，由于对称性，任意主截面内的光线分布都相同。所以，通常只研究一个主截面内的光路。透镜两表面在其主轴上的间隔称为透镜的厚度（以 d 表示）。若厚度跟曲率半径比可忽略时则叫做薄透镜；否则就称为厚透镜。

一、厚透镜成像有什么规律？

厚透镜是由两个折射球面组成的光具组，因此，可用逐次成像的方法求得它最后的像。如图2-12所示。 n 为构成透镜材料的折射率； n_1 和 n_2 分别为物方和像方折射率； r_1 和 r_2 分别表示左右两边球面的曲率半径； t 为厚度；若物距为 S 时，求跟 P 点共轭的像点（对透镜而言） P' 的位置即 S' 值是多少？应用球面成像公式，对两个球面可列出如下两个方程，立即可求得最后的像距。

$$\begin{cases} \frac{n}{S''} - \frac{n_1}{S} = \frac{n - n_1}{r_1} & (\text{对左边球面}) \\ \frac{n_2}{S'} - \frac{n}{S'' - t} = \frac{n_2 - n}{r_2} & (\text{对右边球面}) \end{cases}$$

二、薄透镜成像有什么规律？

薄透镜是厚透镜的特例（镜头中的镜片实际大都是薄透镜）。当 $t \ll S'$ 时，从厚透镜的联立方程中消去 t 就可得到薄透镜的普遍适用的物像公式：

$$\frac{n_2}{S'} - \frac{n_1}{S} = \frac{n - n_1}{r_1} + \frac{n_2 - n}{r_2} \quad (2-9)$$

1. 什么是薄透镜的焦距？

对于薄透镜而言如图2-12所示的 O 与 O' 认为是重合的，这点叫做薄透镜的光心，以 O 表示。物方焦点和像方焦点的定义跟球面镜的相同。分别将 $S = -$ 和 $S' =$ ，代入(2-9)式中，则可得到像方焦距和物方焦距表示式为：（从光心 O 算起）

$$f' = n_2 / \left(\frac{n - n_1}{r_1} + \frac{n_2 - n}{r_2} \right) \quad (2-10)$$

$$f = n_1 / \left(\frac{n - n_1}{r_1} + \frac{n_2 - n}{r_r} \right) \quad (2-11)$$

f' 和 f 的正负，由 r_1 和 r_2 的正负及 n_1 、 n 、 n_2 的大小决定。对于凸透镜 f 为负在物空间， f' 为正在像空间；对凹透而言 f' 为负在物空间、相应的焦点 F' 为虚焦点（出射线反方向延长线的交点）， f 为正在像空间，如图 2-13(a)和(b)所示。

2. 什么叫薄透镜的焦平面和副光轴？

通过焦点 F ， F' 垂直于主光轴的平面分别叫做物方焦平面和像方焦平面。通过光心任一直线称为薄透镜的副光轴，副光轴跟焦平面的交点称为副焦点。与副光轴平行的入射光线其出射线都会聚于副轴跟像方焦平面的交点上，如图 2-14 所示的(a)和(c)；通过（或指向）物方焦平面上某点的光线，经折射后的出射线都跟通过该点的副光轴平行，如图 2-14 中的(b)和(d)所示。上述诸情况在画光路图时，经常要用到。

3. 什么叫做薄透镜的作图求像法？

如图 2-15 所示： P 为近轴物点，我们从以 P 点为顶点的入射光束中选择三条特殊（典型）光线如下：通过光心的光线方向不变；通过（或指向）物方焦点的光线，其出射光线跟主光轴平行；跟主光轴平行的入射光线，其出射光线都交于（或指向像方焦点。在作光路图时，从上述三条光线中任选其中两条，它们出射线的交点就是所求的像点。如果物点在主光轴上，上述三条特殊光线重合为一条，故得不到交点，此时需要用副光轴和焦平面的有关性质来画光路图。

图 2-16 所示为物点在凸透镜主轴上成像作图的具体方法步骤如下：

(1) 从 P 点作沿主轴的入射线，经凸透镜折射后方向不变；

(2) 从 P 点作任意光线 \overline{PA} 跟透镜交于 A 点，跟物方焦平面交于 B 点；

(3) 作辅助线 \overline{BO} （通过 B 点的副光轴），过 A 作平行 \overline{BO} 的折射光线与沿主轴的光线交于 P' ，它就是所求跟物点共轭的像点（ P' ），如图 2-16(a)。

同样，也可以利用像方焦平面及副光轴 $\overline{OB'}$ 作图求得像点 P' ，如图 2-16(b)所示。

上述用物方焦平面或像方焦平面，及副光轴求像的方法，也同样适合于凹透镜成像的情况。不过要注意凹透镜的像方焦平面在物空间，物方焦平面在像空间。图 2-17 所示为用凹透镜的像方焦平面作的成像光路图。步骤如下：

(1) \overline{PA} 为从 P 点（物点）发出的任意光线，与凹透镜交于 A 点（如图 2-17 所示）；

(2) 过凹透镜光心 O 作辅助线（副光轴）平行 \overline{PA} 跟像方焦平面交于 B' 点；

(3) 连接 A ， B' 两点，它的延长线就是出射光线（折射光线）的方向，它与通过主轴的光线交于 P' ，则 P' 点即为所求的像点。同样可利用物

方焦平面及副光轴作图求得像点 P'。上述方法同样适用于轴外（近轴）物点成像的情形。只不过比利用三条典型光线作图复杂罢了。但是，这种方法对处理复杂的光学系统（如显微镜、望远镜等）成像相当方便。

4. 什么叫薄透镜的横向放大率？

我们下边只推导在近轴光学条件下，置于空气中的薄透镜的横向放大率和角放大率。

根据横向放大率的定义（垂直于主轴的像长跟物长之比），和几何知识来推导横向放大率跟物（或焦物）距，像（或焦像）距之间的关系如下：

图 2-18(a)所示带阴影的两个三角形相似，所以 $-y' / y = S' / (-S)$ ， $y' / y = S' / S$ ，因 $y' = y \cdot S' / S$

$$\text{则} \quad \frac{y'}{y} = \frac{S'}{S} \quad (2-12)$$

由图 2-18(b)所示带阴影的两个三角形，对应边成比例，所以 $-y' / y = x' / f'$

$$\text{则} \quad \frac{y'}{y} = \frac{-x'}{f'} \quad (2-13)$$

由图 2-18(c)的示带阴影的两三角形，对应边成比例，所以 $-y' / y = -f' / -x$

$$\text{则} \quad \frac{y'}{y} = \frac{f'}{x} \quad (2-14)$$

由图 2-19 所示两三角形及角放大率定义，来推导角放大率的过程如下

$$\text{tg} u' = u' \cdot \frac{h}{S'}$$

$$\text{tg}(-u) = -u \cdot \frac{h}{-S}$$

$$\text{即} \quad u' \cdot S' = u \cdot S$$

$$\text{则} \quad \frac{u'}{u} = \frac{S}{S'} \quad (2-15)$$

由 (2-12) 及 (2-15) 两式可知，在 $n_1 = n_2$ 的前提下， $\frac{y'}{y}$ 与 $\frac{u'}{u}$ 互为倒数，在近轴条件下， $\frac{y'}{y}$ 与 $\frac{u'}{u}$ 的值其大小跟 y 值（即物长）无关，也就是说，它们跟入射光线的孔径角无关。因此，作光路图时，无论是用三条典型光线，还是采用任意光线其结果都是一致的。

由 (2-14) 式可知，在焦距一定时，透镜对物成像的横向放大率是跟物体远近有关的，物体离镜头愈远 $\frac{y'}{y}$ 值愈小；当物跟透镜距离一定时，透镜的焦距越大，则 $\frac{y'}{y}$ 值也越大。

从前面透镜成像光路图可知：凸透镜对光线有会聚作用，故有时将凸透镜也叫会聚透镜或正透镜；凹透镜则对光线有发散作用，故可叫做发散透镜或叫负透镜。

5. 什么叫薄透镜的高斯公式和牛顿公式？

如果把薄透镜的焦距表示式代入薄透镜的普遍物像公式中，并加以整理即可得到普遍的高斯公式为：

$$\frac{f'}{S'} + \frac{f}{S} = 1 \quad (2-16)$$

如果薄透镜置于空气中 ($n_1 = n_2 = 1$)，普通摄影，大都是这种情况。于是上式变为：

$$\frac{1}{S'} - \frac{1}{S} = \frac{1}{f'} \quad (2-17)$$

有的书上 (2-17) 式中间是加号，是因为符号法则不同的缘故。这是常用的基本公式。

如果把物距及像距以焦物距和焦像距代替则可得到牛顿公式的形式：

$$xx' = ff' \quad (2-18)$$

$$xx' = -f^2 \quad (\text{在 } n_1 = n_2 \text{ 时}) \quad (2-19)$$

三、薄透镜组成像有什么规律？

普通的摄影镜头都是由透镜组组成，可以按每个球面逐次成像法求得最后的像；如果将每个透镜看成是薄透镜时，则可按薄透镜逐次成像法求得最后的像。第一个透镜的像是第二个透镜的物；第二个透镜的像又是第三个透镜的物……。不过每次成像时的参考点是不同的，分别是每个透镜的光心。

可以通过作图法求得像的位置及大小，也可以用解析法（用高斯公式或牛顿公式）计算出未知量。例如前边曾提及过的变焦镜头的前固定组和变倍组是正负透镜的组合。如图 2-20 所示，若凸透镜 L_1 和凹透镜 L_2 的焦距分别为 20.0cm 和 40.0cm， L_1 在 L_2 之右 40.0cm。傍轴小物放在 L_1 之左 30.0cm 处，求它的像，包括像距和横向放大率。

作图法：根据题意，将两透镜和它们焦点的位置，物体的位置按比例标在图 2-20 上。物 PQ 通过 L_1 成实像为 P_1Q_1 ； P_1Q_1 对 L_2 而言是虚物（会聚光束），光线不是从虚物发出的，而是指向虚物的，即 L_1 的出射光束的交点，但在还没有会聚之前就遇到了 L_2 。在画 L_1 成像光路图时，就当作 L_2 不存在，从 P 点引两条入射光线：一条跟主光轴平行；一条通过光心，它们出射线的交点 P_1 即是 P 点的像，由 P_1 作光轴的垂线，其垂足 Q_1 便是 Q 点的像。

L_2 对 P_1Q_1 成像的光路作法：用 L_1 的两条出射线（对 L_2 而言不属于三条特殊光线之列），必须应用焦平面和副光轴的性质。为简单仍用典型光线。所不同的是，光线不是来自 P_1 ，而是指向 P_1 。具体作法如图 2-20 所示，虚线表示光线延长线。

L_1 的放大率为 $\beta_1 = -P_1Q_1/PQ$ ， L_2 的放大率为 $\beta_2 = -P_1'Q'/-P_1Q_1$ ；总放大率 $\beta = \beta_1 \beta_2$

解析法（利用物像关系求未知量）

(a) 利用高斯公式： $1/S' = 1/S = 1/f'$ ，高斯公式是代数式，所以在具体运算时，必须把已知量按符号法则冠以正负号；求得的未知量由它的符号就可以判断它跟光具组的相对位置。仍然用逐次成像法。首先

求 L_1 对旁轴小物 PQ 成的像 P_1Q_1 :

L_1 成像: $S_1 = -30\text{cm}$, $f'_1 = 20\text{cm}$, 求 $S'_1 = ?$

$$\frac{1}{S'_1} - \frac{1}{-30} = \frac{1}{20}, S'_1 = 60.0\text{cm}$$

(S'_1 在 L_1 之右距 O 点 60.0cm 处)。 P_1Q_1 便是 L_2 的虚物再求其像距。

L_2 成像: 已知 (如图 2-20 所示),

$$\overline{Q_1Q_2} = 40.0\text{cm}, S_2 = 20.0\text{cm}$$

$$f'_1 = -40.0\text{cm}$$

求 L_2 对 P_1Q_1 所成像的位置, 即 $S'_2 = ?$

解: 高斯公式:

$$\frac{1}{S'_2} - \frac{1}{S_2} = \frac{1}{f'_2},$$

$$\frac{1}{S'_2} - \frac{1}{20.0} = \frac{1}{-40.0}$$

则 $S'_2 = 40.0\text{cm}$ (居 L_2 之右 20.0cm 处)

(b) 利用牛顿公式: $xx' = ff'$, 如图 2-20 所示, 对 L_1 而言, 焦距和焦物距都是已知, 很容易求得其焦像距 ($\overline{F'_1Q_1}$); 对 L_2 而言其焦物距 ($\overline{F_2Q_1}$) 就算已知, 而且焦距也是已知的, 于是便可求得其焦像距。具体计算如下:

第一次成像:

$$x_1 = -10.0\text{cm}, f_1 = -20.0\text{cm}, f'_1 = 20.0\text{cm},$$

$$x'_1 = \frac{f_1 f'_1}{x_1} = \frac{-20.0 \times 20.0}{-10.0} = 40.0$$

第二次成像:

$$x_{21} = -20.0\text{cm}, f_2 = -40.0\text{cm}, f'_2 = -40.0\text{cm},$$

$$x'_2 = \frac{f_2 f'_2}{x_2} = \frac{40.0 \times (-40.0)}{-20.0} = 80.0$$

显见, 上述三种方法所得结果完全一致。下边我们用不同方法求成像的横向放大率:

几何法:

$$\beta_1 = \frac{\overline{P_1Q_1}}{PQ} = \frac{-2}{1} = -2$$

$$\beta_2 = \frac{\overline{P'Q'}}{\overline{P_1Q_1}} = \frac{-4}{-2} = 2$$

$$\beta = \beta_1 \beta_2 = -4$$

或直接由最后的像长跟物长之比求之

$$\beta = \frac{\overline{P'Q'}}{PQ} = \frac{-4}{1} = -4$$

Q'P' 为放大的倒立的实像。

用 (2-12) 或

$$\begin{aligned} &= \frac{S'}{S} \\ \beta_1 &= \frac{60.0}{-30.0} = -2 \quad \beta = \beta_1 \beta_2 = -4 \\ \beta_2 &= \frac{40.0}{20.0} = 2 \end{aligned}$$

用 (2-13) 或

$$\beta = -\frac{x'}{f'} \text{ 或 (2-14) 或 } \beta = -\frac{f}{x}$$

$$\beta_1 = -\frac{x'}{f'} = \frac{-40.0}{20.0} = -2$$

$$\beta_2 = -\frac{x'}{f'} = \frac{80.0}{-40.0} = 2$$

$$\beta = \beta_1 \beta_2 = (-2) \times 2 = -4$$

可见，三种不同方法计算结果完全相同。

第三节 理想光具组成像有什么规律？

一、什么叫理想光具组？

能够成理想像的光学系统叫做理想光具组或理想光学系统，简称光组。

1. 理想光组能成完善像的条件是什么？

理想光组能成完善像的条件是：能使物空间的同心光束转化为像空间的同心光束，也就是物空间一点经光组成的像仍是一点，即物空间与像空间是：点对点；线线对应；面面对应。

2. 近轴（高斯）光学中所谓的理想光组跟应用光学中的理想光组有什么不同？

近轴光学中光组（如折射球面的组合或透镜组等）都是未经严格设计的光组，只在近轴区才能成完善的像，即成像范围及光束宽度均为无限小。

实际光组如摄影镜头成像，被摄对象总是有一定大小的，而且各物点的光束也要求有一定宽度。应用光学中，将对任意大的范围，以任意大的光束成完善像的系统定义为理想光学系统。尽管应用光学中的光组，如摄影镜头，经过严格设计，但仍不能成完善的像。因此，应用光学中的理想光学系统也只是实际光组的近似。但是，可以利用理想光组成像的特点来比较和估计实际光学系统的成像质量。

在均匀介质中的理想光学系统，物空间及像空间的光线都是直线。物空间一点，在像空间仍然是一点。因此，物跟像的位置就可以用光线通过几何关系来确定。物像的这种几何关系叫做共线成像（或共线变换、共线光学）。

3. 共线光学理论的主要内容是什么？

共线光学理论主要内容如下：

物空间每一点对应于像空间一点，而且，只有唯一的一点；此两点叫做物、像空间的共轭点；

物空间中每一条直线对应于像空间的一条直线，这一对对应的线叫物像两空间的共轭线；

如果物空间的任意点位于直线上，那么在像空间内的共轭点也必在该直线的共轭线上；

物空间的任意平面对应于像空间的一平面。

二、理想光组的重要意义是什么？

在设计光学系统时，设计者必须首先心中有数，根据使用条件，提出具体要求。如物和像的位置、放大率、像的倒正、光学系统的纵向和横向尺寸等。上述要求，必须依据理想光组的理论进行运算以获得数据。

研究或分析一个现有的光学系统，如手头的摄影镜头，要确定其中每一个光学部件的作用，了解各部件间的相互关系等，也得应用理想光学系统理论。

三、理想光组的基点有哪些？

我们知道共线光学理论是物方与像方的点与点，线与线对应，主要是用光线通过几何关系来确定物和像的位置。物与像的几何关系，通常是采用通过几对具有特殊光学特性的典型光线，构成几何图形，再根据图形边角关系来确定物像位置及放大率（横向放大率和角放大率）。光组主光轴上存在三对共轭点：焦点、主点和节点，它们统称为基点。

1. 什么叫理想光组的焦点和焦平面？

一个光组无论是简单（如一个折射球面，一个薄透镜）还是复杂（如多个透镜组成的摄影镜头），只要把它看成是理想光组，就可以由一些基点和基面来决定物像的共轭关系。至于光组的详细情节，诸如像折射面的曲率、间距、构成透镜的光学材料都不用考虑，如图 2-21 所示。图 2-21(a)所示为正光组（会聚光组）的情形，物方焦点在物空间，像方焦点在像空间；图(b)为负（发散）光组，物方焦点在像空间，像方焦点在物空间，各种入射光线，通过负光组后的出射光线都有所发散。图中只给出光组中最前和最后两个折射面及主光轴。跟主轴平行的入射光束（物点在物空间主轴上无限远处），经光组后的出射光束交像空间主轴上一点 F' ， F' 叫光组的像方焦点（或第二焦点、后焦点）。过 F' 的垂轴平面叫光组像方焦平面（第二焦平面、后焦平面）；跟无穷远像点共轭的物点 F ，叫物方焦点（第一焦点、前焦点），过 F 的垂轴平面叫物方焦平面（前焦平面、第一焦平面），（如图(a)、(b)所示）。

F 与 F' 不是共轭点，因物点置于 F 处，像并不成在 F' 点，反之亦然。像方焦平面的共轭平面，是位于物方无限远处的垂轴平面。由物方无限远处射来的任何方向的平行光束，经光组后必会聚于像方焦平面上一点（副焦点）；物方焦平面跟像方无穷远处垂直于主轴的平面共轭，因此，自物方焦平面上任一点发出的光束经光组后，必平行于过该点的副光轴射出。上述焦平面的性质，画光路圈时经常用到。

2. 什么叫理想光组的主点和主平面？

什么叫主点和主平面？

任何理想光组都存在一对横向放大率等于正一的共轭平面。属于物方的叫物方主平面，其轴上点叫物方主点（或叫第一主点，前主点）；属于像方的叫像方主平面，其轴上点叫像方主点。分别用 H 与 H' 表示前主点和后主点。图 2-22(a)和(b)所示是凸透镜的主点和主平面的情形。从物方焦点 F 发出的光束经两次折射后与主光轴平行；平行于主光轴的光束经两次折射后通过像方焦点。在两图中分别将每对共轭线延长并相交，这些交点的轨迹是垂轴平面，便是主平面，它们与主轴的交点便是主点。

为什么主平面是横向放大率等于正一的共轭面？

图 2-23 中， H_1 为双箭头两共轭线在物方主平面上的交点； H'_1 为单箭头两共轭线在像方主平面上的交点。由图 2-22 所示可见，无论是从 F 发出的光线，还是跟主光轴平行的入射光线。其入射高度（入射线跟物方主平面的交点到主轴的距离）是任意的；图 2-22(a)中出射线恰是图(b)中的入射线；若两图中的入射高度相等时，其出射线的高度（出射线跟像方主平面的交点至主轴的距离）必相等。因此，图 2-23 所示的情形是

完全可以实现的。此种情况下 H_1 可以看作是两条入射光线的会聚点——物方主平面上的虚物点， H'_1 则可以看成是 H_1 的虚像点。这对共轭点都在主轴同侧且距主轴的高度都相同，故横向放大率为正一。同理， H_1H 与 H'_1H' 两线段也是共轭的，若将此图线绕至轴旋转一周， H_1H 与 H'_1H' 所在的两个平面也是共轭的。

物方焦距及物距都是以物方主点 H 为坐标原点，在右为正，居左为负；像方量则以 H' 为坐标原点同样是右正左负。但是，物方量不能从 H' 算起；像方量也不能从 H 算起。

四、理想光组的物像有什么关系？

对理想光组已知物求其像，可用图解（作图）法和解析（代数）法：

1. 什么叫图解法？

根据光组的焦点和主点的性质，及物空间点、线、面的位置，用作图的方法求其共轭点、线、面的位置，叫做图解法求像。

(a) 在理想成像的条件下，从一点发出的光束，经光组折射后必交于一点。因此，要确定像点位置，只须求出由物点发出的光束中的两条典型光线在像空间的共轭光线，则它们的交点就是所求的像点。如图 2-24 所示，系统的主点 H 及 H' ；焦点 F 及 F' 位置都是已知的，垂轴物体 PQ 的位置及大小也是已知的。求其像的位置及大小。首先过 Q 点作一平行于主光轴的光线 QM 交物方主平面于 M 点，根据焦点和主平面的性质，光线 QM 经光学系统折射后的出射光线 $M'P'$ 必通过后焦点 F' ；再由 Q 点引一条通过物方焦点的光线，交前主面于 N 点，则其共轭光线 $N'Q'$ 必跟主轴平行。两条折射线的交点 Q' 便是 Q 点的像点；过 Q' 点作垂轴线段 $Q'P'$ ，就是 PQ 的像。

(b) 若物点在主轴上，则上述两条典型光线重合为一条沿主轴传播的光线。因此，必须引一条任意方向的光线，要确定其出射线的方向则需要应用焦平面的性质。如图 2-25(a) 所示，用作图法求轴上点 A 的像点：过 A 作任一条入射线 AM ，可以认为此光线是由轴外无穷远物点发出的平行光束（斜射光束）中的一条，再过前焦点 F 作一辅助光线与其平行，这两条光线构成斜平行光束。它们应会聚于像方焦平面上一点。这一点可由辅助光线来决定，因辅助光线出射系统后，应平行于主光轴，与后焦平面交于 B' ，由此可确定出射线的方向，它跟主轴的交点 A' 便是所求的像点；也可以用图 2-25(b) 所示的方法求像点 A' 。

2. 什么叫解析法？

如果一个物体相对于光组的位置是已知的，用公式计算像的位置和大小的方法叫解析法。此种方法没有作图法求像方便、直观，但比较精确。由于所取坐标原点不同，也分牛顿公式和高斯公式两种。如图 2-26 所示。 x 为焦物距，它是以 F 点为原点， x' 为焦像距，是以 F' 点为原点，符号都是左负右正。图中标的都是几何量（正值）。

(a) 如何推导牛顿公式？

如上图所示，四个三角形：1、2、3、4。可有下式：

$$\frac{-y'}{y} = \frac{-f}{-x}, \quad \frac{-y'}{y} = \frac{x'}{f'}$$

$$\text{则 } xx' = ff' \quad (2-20)$$

相对于牛顿公式的横向放大率为

$$= \frac{y'}{y} = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f'} \quad (2-21)$$

(b)如何推导高斯公式？

如上图所示，S表示物点P至物方主点H的距离（物距），S'表示像点P'至像方主点H'的距离，S及S'的符号是以主点（H及H'）（为坐标原点，仍然是左负右正。由图可知： $x = S - f$ ； $x' = S' - f'$ ，代入牛顿公式，整理得到高斯公式如下：

$$\frac{f'}{s'} + \frac{f}{s} \quad (2-22)$$

摄影镜头多数情况是在同种介质中使用，此时 $f = -f'$ 上式变为：

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'} \quad (2-23)$$

相对高斯公式的横向放大率也可以由牛顿推导出：将 $x' = \frac{ff'}{x}$ 的

两边各加上 f' ，再将 $x' + f' = s'$ 及 $x + f = s$ 代入，并整理得：

$$\frac{-f}{x} = -\frac{x'}{f'} = \frac{s'}{s} \quad (2-23) \text{ 即 } = \frac{s'}{s} \quad (2-24) \text{ (a)}$$

以上高斯公式及其横向放大率均由牛顿公式推导而得；反之，牛顿公式也可以由高斯公式推导而得；或者它们都直接由光路图中边角关系推得。

任何型号的摄影镜头，只要将其看成是理想光组，求得基点后，就可按图 2-26 的方法作图求得像的位置。

五、联合光组的放大率为什么等于各部分放大率之积？

一个光学系统可以由一个部件或几个部件组成，每个部件可以由一个透镜和几个透镜组成。每个部件都可以单独看作一个光组。例如照相机的变焦镜头通常是由四部分组成：前固定组、变倍组、补偿组和后固定组。变焦镜头的放大率就等于四部分放大率之积。下边我们推导由三个部件组成的光学系统的放大率。若物长为 y ，通过三个部件成像的高度为： y'_1 、 y'_2 、 y'_3 。证明：

$$= y'_1 y'_2 y'_3 \quad (2-24) \text{ (b)}$$

因为第一光组的像是第二光组的物，即：

$$y_2 = y'_1$$

第二光组的像是第三光组的物，即：

$$y_3 = y'_2$$

第三光组的像也就是联合光组的像，即：

$$y'_3 = y'$$

根据横向放大率的定义有： $\beta_1 = \frac{y'_1}{y_1} = \beta_2 = \frac{y'_2}{y_2}$ ， $\beta_3 = \frac{y'_3}{y_3} = \frac{y'_1}{y_2}$ ，
 $= \frac{y'_1}{y_1}$ 。

$$\text{则 } \beta = y'_1 / y_1 = \frac{\beta_3 y'_3}{y_1} = \frac{\beta_2 \beta_1 y'_1}{y_1} = \beta_1 \beta_2 \beta_3 \quad (2-25)$$

六、什么叫联合光组的光焦度？

光学系统的光焦度是光学系统的会聚本领或发散本领的数值表示，其数值的大小用 n' / f' 或 n / f 来量度，若用 ϕ 表示光组的光焦度时则：

$$\phi = \frac{n'}{f'} \quad (2-26)$$

若光组置于空气则

$$\phi = \frac{1}{f'} = -\frac{1}{f}$$

普通摄影即适用式 (2-27) 所示情况。光学系统的光焦度为正表示它是正组，对光线有会聚作用； ϕ 为负表示光组是负组，对光线有发散作用。照相机镜头通常都是由正负光焦度的光组构成的联合光具组，这种联合光具组的光焦度一定为正。照相机的短焦距镜头（鱼镜头、广角镜头）具有大光焦度，它将使出射光束相对于入射光束有非常大的偏折作用。而望远系统（无焦系统），则对光束不起偏折作用（只改变光束孔径），光焦度为零，焦距为无限大。

七、理想光组对任意大小物体用任意宽光束成像的普通公式是什么？

在图 2-27 中，轴上物点 P 发出的光线 PM 与光轴成 u 角，交物方主平面于 M 点，入射高度为 h 。PM 的共轭光线 $M'P'$ ，交主平面于 M' 点，和光轴交角为 u' 。由直角三角形 PMH 和 $P'M'H'$ 有

$$h = s \tan u = s' \tan u'$$

$$\text{或 } (x + f) \tan u = (x' + f') \tan u'$$

由式 (2-21)，得 $x = \frac{-y}{y'} f$ 和 $x' = \frac{-y'}{y} f'$ 代入上式得

$$y f \tan u = -y' f' \tan u' \quad (2-28)$$

对于理想光组，上式对 u (或 y)、 u' (或 y') 取任何值时都成立，当然当 u (或 u') 趋于零时也成立：

$$y f u = y' f' u'$$

和 (2-6) 式中拉氏不变量 $n y' u' = n' u' y'$ 相比可得：

$$\frac{f'}{f} = \frac{-n'}{n} \quad (2-29)$$

若物方和像方介质相同则：

$$f = -f'$$

将 (2-29) 代到 (2-28) 中则：

$$nytgu = n' y' tgu' \quad (2-30)$$

它是光组对任意大小物体用任意宽光束成像的普遍公式——拉赫公式。

八、什么叫角放大率？

如图 2-27 所示，过光轴上一对共轭点，任取一对共轭光线 PM 和 P'M'，其与光轴的夹角分别为 u 与 u' ，这两角的正切之比，叫这对共轭点的角放大率，即：

$$v = \frac{tgu'}{tgu} \quad (2-31)$$

将 (2-28) 式中的 tgu' 与 tgu 的关系代入得

$$v = \frac{tgu'}{tgu} = -\frac{y}{y'} \cdot \frac{f}{f'} = -\frac{1}{\beta} \cdot \frac{f}{f'} = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{n}{n'} \quad (2-32)$$

如果光学系统在同种介质中，则

$$v = \frac{1}{\beta} \quad (2-33)$$

如果将 $\beta = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f'}$ 代入 (2-32) 式中，

$$v = -\frac{1}{\beta} \cdot \frac{f}{f'} = \frac{x}{f'} = \frac{f}{x'} \quad (2-33)$$

显然，角放大率与角 u 及 u' 无关，只跟物体的位置有关。在同一对共轭点上，所有共轭光线与光轴夹角的正切之比恒为常数。

九、什么叫光组的节点？

1. 何为光组的节点？

在光组主轴上存在一对角放大率等于正 1 的一对共轭点叫做光组的节点。属于物方的叫做物方节点，属于像方的叫做像方节点。分别以 K 与 K' 表示。角放在等于正一，说明通过节点的一对共轭线是平行的且方向相同如图 2-28 所示。

2. 如何确定节点的位置？

根据 (2-33) 式， $v = x/f' = f/x' = 1$ ，则：

$$x = f'$$

$$x' = f'$$

上述结果说明，物方节点距物方焦点的距离等于像方焦距值，如 f' 为正则 F 点往右量，距离等于 $|f'|$ 处即为 K 点；如 f' 为负，则从 F 点往左量，距离等于 $|f'|$ 处即为 K 点；同样也可以确定 K' 点的位置。

如果光组处于同种介质中，节点跟主点重合。普通摄影时，镜头就是处于同种介质——空气中。如果是薄透镜，则前后主点和前后节点四点合而为一称为光心，以 O 表示，所以 O 点同时具有主点和节点的性质。

3. 如何用节点的性质画光路图？

以前我们用焦点和主点的性质可以用图解法求像。同样，用焦点和节点的性质也可以用图解法求像。如图 2-29 所示，当相机镜头置于空气

中时，则主点跟节点重合，并设主点和焦点的位置是已知的，由物体 PQ 的 Q 点引一条通过前节点（即前主点）的光线，则共轭光线一定通过后节点（即后主点）且与入射线平行；再作一条平行于光轴的光线或过物方焦点的光线，与其共轭的出射光线必通过像方焦点或平行于主光轴，与通过像方节点的光线相交 Q' 点，它即是 Q 点的像，过 Q' 点作垂轴线段 P'Q'，就是物体 PQ 的像。

4. 节点的物性有什么应用？

节点的特性除用于画光路图之外，还被用在全景照相机上，这种相机称作转机。其原理就是让相机的镜头绕通过像方节点的轴旋转，将其底片改在以像距为半径的圆弧面上，就可以摄得大场面的照片。

如图 2 - 30 所示：被摄人群处在以像方节点 K' 为圆心，以物距与两节点间距离之和为半径圆弧线上；胶片则放在以后节点为圆心，以像距为半径的圆弧面上。普通转机，常在镜头前和镜头后（曝光窗）装有狭缝。来自被摄体的光线必须同时通过两个狭缝（前者为入射线，后者为出射线）才能使胶片某一小区域感光，形成清晰影像。当曝光窗狭缝位于 u 时，自左上方被摄体射入的光线通过镜头在胶片 a 小区域内可形成清晰的像；当摄影镜头连同曝光窗狭缝绕 K' 点顺时针旋转至正前方时，自正前方被摄体射入的光线，通过摄影镜头在胶片小区域 b 可形成清晰像；随着摄影镜头的旋转，曝光窗狭缝就依次扫过整个胶片，因此，就可以获得较大场面的照片。

十、如何测定摄影镜头的基点？

摄影镜头的基点，虽看不到，摸不着，但却客观的存在着并能测定。我们不涉及如何精确地测定基点的问题，只介绍一下简便宜行的方法。

1. 如何测定焦点？

摄影镜头总体是一个正光组，相当于一个厚透镜，对光线起会聚作用。让太阳光直射镜头，如图 2 - 31 所示，在光组后用一小屏（如一张白纸）沿光轴左右移动，如移动到 a 或 b 处，屏上的光斑直径都较大，唯独在 F' 处，光斑最小，可近似为一点（此处纸屏可被烧焦），F' 就是镜头后焦点；同样，将镜头左右对调则可测出物方焦点 F。

2. 如何测定镜头的主点和节点？

普通摄影，镜头总是置于空气中，物方主点跟物方节点重合；像方主点跟像方节点重合。因此，只要测得其节点，主点自然也就被测得了。这就得根据节点的性质来测节点。

如图 2 - 32 所示：保持被摄物体和像面不动。将镜头绕垂直于纸面的轴旋转，轴心位置不同时，像点的位置也不同。但轴心通过镜头的后节点时，像点的位置不变。图(a)所示镜头是静止的，平行光束的像点为 P'；镜头绕像方节点 K' 顺时针旋转一小角度如图(b)所示，像点的位置未变；图(c)所示。轴心未通过后节点时镜头旋转一小角度，像点的位置却改变了。因为，两节点是角放大率等于正 1 的共轭点，图 2 - 32 中入射光线的方向都是沿横坐标轴 x 方向进行的，所以过后节点的出射线必须平行于入射光线，其跟像面的交点就是平行光束的清晰像点。

令摄影镜头沿 x 轴缓慢平移，同时又绕垂直于纸面的轴 (O) 轻轻左

右旋转，直至平行光束或无限远景物的像在旋转时不发生位移为止。此时，旋转中心 O 恰好跟后节点重合，故可准确的测定 K' 点；若将镜头前后颠倒，同样可测出镜头前节点。

十一、摄影镜头的基点如何布局？

各种相机都是根据使用要求确定结构尺寸的，其结构内容包括系统的组成，各组元的焦距，各组元的相对位置和横向尺寸。其中摄影镜头基点的布局直接影响相机的轴向（长度）尺寸，镜头的孔径直接影响相机的横向尺寸。

1. 摄影镜头横向尺寸中主要有几部分？

(a) 什么叫像面定位距？

镜头与镜头座相配合的镜筒轴向定位端面，至该镜头的焦平面（曝光窗平面）之间的距离叫像面定位距。

(b) 什么叫后工作距（后截距、后顶焦距、像方顶焦距）？自摄影镜头最后一片透镜的后顶点，到其像方焦点的距离叫后工作距。

(c) 什么叫前顶焦距？

自摄影镜头最前一片透镜的前顶点到物方焦点的距离叫前顶焦距。其值的大小决定了镜头前片距被摄物平面间的空间大小。

(d) 什么叫光学长度？

自摄影镜头第一片透镜的前顶点到其最后一一片透镜的后顶点之间的距离叫摄影镜头的光学长度。

2. 摄影镜头按焦距长短分几类？

摄影镜头可以不同标准分类。其中以焦距为标准可分为三类：标准镜头、广角镜头和长焦镜头。

(a) 什么叫标准镜头？

在照相机使用的镜头系列中，通常将焦距值跟所摄画幅对角线相接近的那个摄影镜头，叫做标准摄影镜头。例如卡侬 135 单镜头反光照相机，画幅尺寸为 $24\text{ mm} \times 36\text{ mm}$ 。其摄影镜头系列共备有 55 种不同焦距和性能的摄影镜头。其中焦距为 50 mm （画幅对角线长为 43.27 mm ）的摄影镜头称为该 135 型相机的标准镜头。

(b) 什么叫长焦距和短焦距摄影镜头？通常把焦距比标准镜头焦距长的镜头称为长焦距镜头；把焦距比标准镜头焦距短的镜头称为短焦距摄影镜头。

3. 摄影镜头的基点布局有几种情况？

普通摄影镜头都置于空气中，因此节点跟主点是重合的，故只研究镜头焦点和主点的分布情况。基点分布情况是多种多样的，我们仅举几个例子来说明。

例一，120 型柯克镜头，画幅尺寸为 $56\text{ mm} \times 56\text{ mm}$ ，对角线尺寸为 79.20 mm 。其中 $-l_F$ 为前顶焦距， l_F 为后工作距，物（像）方焦点及物（像）主点等分布如图 2-33 所示。图 2-34 所示为尼柯 50 mm 镜头的基点分布情况。 F 与 F' 为物方和像方焦点； H 与 H' 为物方和像方主点； $-f$ 为物方焦距； f' 为像方焦距； l_F 为后工作距； $-l_F$ 为前工作距； l 为光学长度； l 为镜筒长度。对普通摄影镜头而言，通常 F 通常位于前顶点

之前。例二，长焦距镜头的基点分布如图 2 - 35(a)和(b)所示。为了拍摄远景，又要使远处物体在像面上形成较大的像，必须得用长焦距镜头。焦距长，相机结构相应的要大，为了缩短筒长，常采用正负组分离且正组在前的结构。图(a)为柯克摄远物镜，它的焦距在 100 mm ~ 500 mm；视场角在 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ ；相对孔径从 1:8 ~ 1:3.5，是长焦距摄影镜头中最基本的一种。这种摄远型结构，使主面平推向物空间，筒长() 小于焦距 (f')，一般筒长可缩短三分之一。图 2 - 35(b)所示为尼柯，Q - AUTO400 mm、1:4.5 长焦距摄影镜头的光学结构图，其基点分布如图(b)所示。可见，同是长焦镜头，基点分布也不完全相同。图(a)H' 位于前顶点之外(左)；图(b)H' 位于前顶点之后的镜组中间。

例三，短焦距(反摄远型)镜头基点的分布，如图 2 - 35(c)所示。在普通照相或电影摄影中，为了获得较大视场的影像和丰富的体视感，宜采用短焦距的广角镜头。由于物镜和底片之间要放置分光元件或反光元件，希望镜头有较长的后工作距。为此宜采用如 2 - 35(c)所示的反远摄型结构，就能得到大于焦距的后工作距离。

总之，不同摄影镜头的主点 H 与 H' 相对镜筒的位置是各不相同的：有的位于光圈叶片附近，有的位于镜筒前部，有的位于镜筒后部，有的位于摄影镜头外部。通常情况下，H 位于物方，H' 位于像方，但也有两者倒置的情况。

在普通摄影镜头上，一般物方焦点 F 位于摄影镜头前顶点的前方，但也有少数摄影镜头的物方焦点 F 位于摄影镜头内部。

还有少数变焦镜头，当焦距变到某一值时，物方主点 H 后移一到该镜头像方焦点 F' 的后边。如法国昂热尼 15 × 变焦镜头应存在上述情况。但是，不管摄影镜头基点分布如何千变万化，所遵循的原则是相同的：如果把各种不同摄影镜头都看为是理想光具组，都必须满足理想光组的物像关系；满足需要的放大率；使相机既轻便，同时又能容纳下该有的元件。

第四节 联合光具组成像有什么规律？

一、什么叫联合光具组？

实际的光学系统如摄影镜头，通常是由若干个光组构成，光组可以是单透镜也可以是复杂的透镜组。将这若干光组构成的总体叫做联合光具组。

在实际工作中，常把几个光组结合在一起，求其等效光学系统的基点位置。或者把一个光学系统分解成几个光组，求出每个光组的基点位置。这都是光学系统的组合问题。

二、怎样求联合光具组的基点？

两个光组的组合是最基本的联合光具组。如果一个光学系统是由若干个光组构成，首先把前两个光组（它们的基点位置及它们间距都已知）联合，求出其等效光组的基点。然后再将等效光组跟下个光组联合，依次类推则可求得整个光学系统的基点。

1. 怎样用几何法求联合光组基点？

如图 2-36 所示：在物空间引一条平行于光轴的光线 RM_1 ，经第一光组折射后，通过 F'_1 射入第二个光组，交于第二个光组的像方主平面于 M_2 处，等高地由像方主平面 H'_2 的 M'_2 射出，其出射线 M'_2F' 必平行于辅助线 BK_2 ，光线 M'_2F' 和光轴交于 F' ，则 F' 为等效系统的后焦点。入射线 RM_1 的延长线与其共轭线 M'_2 交于 M' ，过 M' 的垂轴平面，即为等效系统的像方主平面，其与光轴的交点 H' 为等效系统的像方主点。线段 $H'F'$ 是等效系统的像方焦距值。

如果令光线从反向入射，则可求得等效系统的物方主点、焦点和物方焦距值。

2. 怎样用解析法求联合光具组的基点？

已知两个光组的焦距分别为 f_1 、 f'_1 和 f_2 、 F'_2 及 F'_2 与 F'_1 之间的距离（叫两系统的光学间隔）来表示两光组的相对位置。 F_2 、 F'_1 之右时，为正； F_2 在 F'_1 之左时，为负。两个光组中涉及的距离都遵循前述的符号规则。

例：求联合光组的焦点和主点位置及焦距（普通摄影其镜头置于空气中，节点跟主点重合）。

解：用已知量表示出联合光具组焦点 F 、 F' 及主点 H 、 H' 的位置。

求焦点位置：如图 2-36 所示，对光组而言，等效系统的像方焦点 F' 和光组的像方焦点是一对共轭点（ F'_1 为物点， F' 为像点），应用牛顿公式可得：

$$\begin{aligned}(-\Delta)x'_2 &= f_2 f' \\ x'_2 &= \frac{-f_2 f'_2}{\Delta} \quad (2-34(a))\end{aligned}$$

根据光组的符号法则， F' 在 F'_2 之右 x'_2 为正，反之 x'_2 为负。

求得 x'_2 值，等效光组像方焦点 F' 就被确定；同理，令光线从反方向入射，对光组应用牛顿公式可求出等效光组物方焦点相对光组 F' 的位置。

$$x_1 = \frac{f_1 f'_1}{\Delta} \quad (2-34(b))$$

求联合光组主点位置（主点到焦点的距离为焦距）。 F' 在 H' 之左， f' 取负值，居右则为正，可通过边角关系求得。如图 2-36 所示可知。

$$u'_1 = u_2, \quad -u' = u'_2$$

所以

$$\frac{u'_1}{u} = \frac{u_2}{u'_2} \quad (2-35)$$

在近轴条件下

$$u' \operatorname{tg} u'_1 = \frac{h}{f'_1}, \quad u' = \frac{h}{f'},$$

$$u_2 = \frac{-h'}{\Delta - f_2}, \quad u'_2 = \frac{-h'}{f'_2 + x'_2},$$

令光线反向入射也类同，由上边诸式及式 (2-34) 可得

$$\begin{cases} f' = -\frac{f'_1 + f'_2}{\Delta} & (2-36(a)) \\ f = \frac{f_1 + f_2}{\Delta} & (2-36(b)) \end{cases}$$

可见 f' 及 f 的符号决定于两个光组焦距的符号及两个光组的光学间隔的符号。因此主点的位置可由焦距的符号和数值及焦点的位置来确定。故联合光组的物方和像方焦点位置分别以第一光组的前焦点和第二光组的后焦点为参考点，其数值用式 (2-34(a)(b)) 求得；求得联合光组的前后焦点之后，可由式 (2-35(a)(b)) 分别求出焦距，再确定前后主点的位置。变焦镜头就是多个组元组成的复合光组，是通过改变部分组元的光学间隔实现变焦的，就是以式 (2-36) 为理论依据的。

三、单球面的基点如何分布？

球面是最简单、最基本的光组。用几何法同样可求得球面的焦点和主点。如图 2-37 所示。两边的入射光线 AD 和 BD ，交球面于 D 点，与其共轭的两折射线也交直线 AB 于同一点 D ，因此物方与像方两个主平面重合（过 D 的垂直平面），当入射高度很小时，就是跟球面顶点相切的平面。两个节点 K 及 K' 跟球心重合。

在近轴条件下，应用式 (2-2)，并分别将物距和像距为 r 代入可得两个焦距：

$$\begin{cases} f = -\frac{nr}{n' - n} \\ f' = \frac{n'r}{n' - n} \end{cases} \quad (2-36(c))$$

反射球面的基点，同样可由几何法求得，如图 2 - 38 所示。在折反系统中（折反摄影镜头），它也是最基本的光组。

四、厚透镜的基点如何分布？

把厚透镜看作是两个单折射球面的联合光具组，求出等效光组的基点便是厚透镜的基点。

如图 2 - 39 所示，设两个球面的半径分别为 r_1 和 r_2 ，透镜的厚度为 d ，折射率为 n ，若透镜置于空气中，则 $n_1 = n'_2 = 1$ ， $n'_1 = n_2 = n$ 。由式 (2 - 36 (c)) 可知：

$$f_1 = \frac{-r_1}{n-1}, f'_1 = \frac{nr_1}{n-1}$$

$$f_2 = \frac{n_2 r_2}{n-1}, f'_2 = \frac{r_2}{n-1}$$

如图所示以 d 表示 时则：

$$\Delta = d - f'_1 + f_2 = \frac{n(r_2 - r_1) + (n-1)d}{n-1}$$

由式 (2 - 36) 求得厚透镜的焦距为：

$$f' = \frac{f'_1 f'_2}{\Delta} = \frac{nr_1 r_2}{(n-1)[n(r_2 - r_1) + (n-d)d]} \quad (2-37(a))$$

透镜置于空气中时，

$$f = -f' = \frac{-nr_1 r_2}{(n-1)[n(r_2 - r_1) + (n-1)d]} \quad (2-37(b))$$

确定等效系统焦点位置：以两个分光组的焦点 F_1 、 F'_2 为坐标原点，由式 (2 - 34(a)、(b)) 求出 x_1 、 x'_2 ；也可用光组 物方主点及第 光组像方主点为坐标原点求出 l_F 、 l'_F ，由图 2 - 39，则：

$$l'_F = f'_2 + x'_2$$

$$l_F = (-x_1) + (-f_1)$$

将 x_1 、 x'_2 、 f_1 、 f'_2 的具体表示式，代入上式中则：

$$\left\{ \begin{array}{l} l'_F = f' \left(1 - \frac{d}{f'_1} \right) \quad (2-38(b)) \\ l_F = -f' \left(1 + \frac{d}{f_2} \right) \quad (3-38(c)) \end{array} \right.$$

同样以光组 像方主点及光组 物方主点为坐标原点来确定等效光组的主点，如图 2 - 39 所示：

$$\left\{ \begin{aligned} l'_H &= f'_2 + x'_2 + (-f') \\ &= \frac{-dr_2}{n(r_2 - r_1) + (n-1)d} \quad (2-39(a)) \\ l_H &= -f + x_1 + f_1 \\ &= \frac{-dr_1}{n(r_2 - r_1) + (n-1)d} \quad (2-39(b)) \end{aligned} \right.$$

薄透镜是厚透镜的特例，即 $d = 0$ 的情形，此时， O_1 与 O_2 重合，由式 (2-38(a)) 与式 (2-38(b)) 可知

$$l'_F = -l_F = f'$$

由式 (2-39(a)) 与 (b)) 可知

$$l'_H = l_H = 0$$

等效系统的两主点重合于 O ，如图 2-40 所示。那怎样求厚透镜的基点？摄影镜头通常都是复杂的透镜组，而且每个透镜都有一定的厚度，欲求镜头的基点，可先求出每个透镜的基点，然后进行组合。因此，对透镜的基点分布进行分析是非常必要的。

1. 双凸透镜基点分布如何？

分析透镜的基点分布，可以用几何法（通过光路图直观的求得基点）和解析法（用式 2-37 和 2-39）。用作图法可定性求得基点的位置，并且对各种透镜都适用，其作法如下所示。

作平行于主光轴的入射光线，经过两个折射球面折射后的出射光线（或反向延长线）跟入射线（或延长线）的交点为像方主平面上的点；过此点作垂轴平面（像方主平面），它与主轴的交点就是 H' （第二主点）；出射线跟主光轴的交点就是像方焦点。

令光线反向入射，同样可求得物方主点和焦点。双凸透镜 $r_1 > 0$ （左边球面半径）， $r_2 < 0$ （右边球面半径），以顶点为坐标原点。由式 (2-37) 可知当半径 r_1 和 r_2 一定时，随厚度 d 不同焦距 f' 可正、可负。透镜折射率肯定是大于 1 的正数，式 (2-37(a)) 中的分子为负，而分母的正负由 d 值大小决定。当 $(n-1)d > |n(r_2 - r_1)|$ ，分母为正， f' 为负；当 $(n-1)d < |n(r_2 - r_1)|$ 该式分子与分母同时为负故 f' 为正。同样通过分析 (2-39) 式可知 l'_H 与 l_H 的正负。

$$\text{当 } d < \left| \frac{n(r_2 - r_1)}{n-1} \right| \text{ 时则式 (2-37(a)) 分子与分母同时为负，}$$

故 $f' > 0$ ，此时透镜为会聚透镜。由式 (2-39(a)) 可知，分子为正 ($r_2 < 0$)，分母为负，则 $l'_H < 0$ ，说明 H' 位于光组主点之左；同理可知 $l_H > 0$ ， H 位于光组顶点之右。如图 2-41(a) 所示。

当透镜厚度 $d = r_1 - r_2$ ，即两个面的球心重合。由式 (2-37) (a) 可知 $f' > 0$ ，由式 (2-39(a)) 与 (2-39(b)) 可知： $l'_H = r_2$ ， $l_H = r_1$ ，说明透镜的两个主平面重合，并位于两个面的共同球心处如图 2-41(b) 所示。

$$\text{当 } d = -\frac{n(r_2 - r_1)}{n-1} \text{ 时，代入式 (2-27(a)) 与 (2-27(b)) 式，}$$

分母为 0，所以 f' 与 f 都为无限大，主平面也在无限远处，此时透镜为无焦系统，如图 2 - 41 (c) 所示。

当透镜的厚度增大到 $d > \frac{n(r_2 - r_1)}{n-1}$ ，由式 (2 - 37 (a)) 可

知 $f' < 0$ ，说明等效光组像方焦点位于其主点 H' 之左。由式 (2 - 39(a)) 及 (2 - 39(b)) 可知 $l'_H > 0$ ，主点位于第二个球面之右， $l_H < 0$ ， H 点位于第一球面之左，即二主平面位于透镜之外如图 2 - 41 (d) 所示。

2. 双凹透镜基点如何分布？

这种透镜 $r_1 < 0$ ， $r_2 > 0$ ，由式 (2 - 37(a)) 可知，两球面等效系统 (即双凹透镜) 的焦距 f' 总为负值，是发散透镜。由式 (2—39(a)) 与 (2 - 39(b)) 可知 $l'_H < 0$ ， $l_H > 0$ ，两主平面位于透镜内部，如图 2 - 42 所示。

3. 负弯月型透镜基点分布如何？

图 2 - 43 所示各种情况均为负弯月型透镜，其共同点是 $r_1 > 0$ ， $r_2 > 0$ (两折射面半径符号相同)，其焦距的符号随 d 值的大小而异。

当 $d < \frac{n(r_1 - r_2)}{n-1}$ 时， $f' < 0$ ， $l'_H > 0$ ， $l_H > 0$ ，是发散透镜，主面偏于球心方向，如图 2 - 43(a) 所示。

当 $d = r_1 - r_2$ 时，两球面同心， $f' < 0$ ， $l'_H = r_2$ ， $l_H = r_1$ ，透镜仍为发散透镜，二主面重合于二面的共同球心处，如图 2 - 43(b) 所示。

当 $d = \frac{n(r_1 + r_2)}{n-1}$ 时， $f' = \infty$ ， $l'_H = \infty$ ， $l_H = \infty$ ，此时透镜为望远系统 (无焦系统)，如图 2 - 43 (c) 所示。

当 $d > \frac{n(r_1 - r_2)}{n-1}$ 时， $f'_1 > 0$ ， $l'_H < 0$ ， $l_H < 0$ ，该光学系统为会聚透镜，主面位于折射面之左 (跟球心相对的方向)，如图 2 - 43 (d) 所示。

4. 平凸透镜基点分布如何？

由一个平面和一个凸面构成的透镜，设其 $r_1 > 0$ ， $r_2 = \infty$ ，此时，焦距公式和主点位置公式为：

$$f' = \frac{r_1}{n-1}$$

$$l'_H = -\frac{d}{n}, l_H = 0$$

可见平凸透镜的像方焦距总为正，跟透镜厚度 d 无关，一个主面与球面相切，另一个位于透镜内部，如图 2 - 44 所示。

5. 平凹透镜基点分布如何？

该系统是由一个平面和一个凹面组成，令 $r_1 > 0$ ， $r_2 = -\infty$ ，则焦距公式和主点位置公式为：

$$f' = \frac{r_1}{n-1}$$

$$l'_H = -\frac{d}{n} l_H = 0$$

显然，平凹透镜总为负透镜，焦距跟厚度无关，一个主面与球面顶点相切，另一主面位于透镜内部，如图 2 - 45 所示。

6. 正弯月型透镜的基点分布如何？

如图 2 - 46 所示，二折射面半径同号（弯曲方向相同），跟负弯月型透镜的区别，在于凸面半径绝对值的凹面半径小， $r_2 > r_1 > 0$ ，则 $f > 0$ ， $l'_H < 0$ ， $l_H < 0$ ，物方主平面在凸面之前，像方主平面在凹面之前。上述各种透镜在相机镜头中都有应用。

五、怎样求联合光具组的光焦距

如果光焦具组置于空气中，其光焦距等于其焦距的倒数。同样，联合光组的光焦距也等于其焦距的倒数。将 $d = d - f'_1 - (-f_2)$ （由图 2 - 36 可见）及 $-f_2 = f'_2$ 代入式（2 - 36(a)）则：

$$f' = \frac{f'_1 + f'_2}{f'_1 + f'_2 - d} \quad (2-40(a))$$

$$\begin{aligned} \psi &= \frac{1}{f'} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} - \frac{d}{f'_1 f'_2} \\ &= \phi_1 + \phi_2 - d\phi_1\phi_2 \quad (2-40(b)) \end{aligned}$$

如果两光组间距非常小（ $d \rightarrow 0$ ）或胶合在一起，如胶合透镜（消色差、消球差、消像散等），则 $d = 0$ ，那么：

$$\phi = \phi_1 + \phi_2$$

六、怎样计算实际光学系统的基点？

摄影镜头的各光组及摄影镜头跟近摄镜、倍率镜、滤色镜等的组合都是具体的实际光学系统。

1. 怎样计算实际光学系统的基点位置？

前面研究的理想光组在近轴区所得的公式，跟近轴（高斯）区所得的结果完全一致，这说明一切共轴球面系统的近轴区都是实际的理想光学系统。也就是说理想光学系统理论可以适用于实际光学系统的近轴区，故实际光学系统基点的位置就是指近轴区的基点位置。

摄影镜头本身或摄影镜头跟附加镜组成的联合光组，大都是共轴的透镜组，透镜都有一定的厚度，只要将每个透镜的基点求得，然后再进行组合，最终总可以求得等效光具组的基点位置。这种方法应用于两个光组构成的光学系统还是比较方便的。对于多个光组构成的光学系统，这种方法就显得过于繁琐，同时还容易出错，故常用下述两种方法解决。

2. 什么叫正切算法？

如图 2 - 47 所示： RM_1 为任意平行于主光轴的入射光线， M'_3F' 是与其共轭的经过整个光组的出射线，光线经过每个光组的高度分别为 h_1 、 h_2 、 h_3 、 u_3 为出射线与光轴的交角。由图 2 - 47 可知：

$$l'_F = \frac{h_3}{\text{tgu}'_3}$$

$$f' = \frac{h}{\text{tgu}'_3}$$

如果系统是由 i 个光组构成的则有：

$$l'_F = \frac{h_i}{\text{tgu}'_i}$$

$$f' = \frac{h}{\text{tgu}'_i} \quad (2-41)$$

显然，只要求出最后出射线的出射高度 h_i 及其与光轴的交角 u'_i ，焦点及主点的位置就被确定，自然焦距就可求得。将高斯公式经过等式变换，并根据几何中的边角关系可导出下式：

$$\text{tgu}'_1 = \text{tgu}_2 = \frac{h_1}{f'_1}$$

$$h_2 = h_1 - d_1 \text{tgu}'_1$$

$$\text{tgu}'_2 = \text{tgu}_3 = \text{tgu}_2 + \frac{h_2}{f'_2} \quad (2-42)$$

$$h_3 = h_2 - d_2 \text{tgu}'_2$$

.....

$$h_i = h_{i-1} - d_{i-1} \text{tgu}'_{i-1}$$

$$\text{tgu}'_i = \text{tgu}_i + \frac{h_i}{f'_i}$$

因为第一光组的出射线就是第二光组的入射线，即 $u'_1 = u_2$ ，又因入射线的任意性，故 h_1 是已知的，各光组的焦距（或基点）及它们的间距都是已知的。所以用（2-42）式可求出 tgu'_i 及 h_i 再将其代入（2-41）式便可求出等效系统的焦点、主点（即焦距）。这种方法叫做正切计算法。

3. 什么叫截距计算法？

将（2-41）式写为：

$$f' = \frac{h_1}{\text{tgu}'_i} = \frac{h_1}{\text{tgu}'_1} \cdot \frac{\text{tgu}_2}{\text{tgu}'_1} \cdot \frac{\text{tgu}_3}{\text{tgu}'_2} \cdots \frac{\text{tgu}_i}{\text{tgu}'_{i-1}}$$

因为第一光组的出射角恰是第二光组的入射角即 $u'_1 = u_2$ ；第二光组出射角又是第三光组的入射角即 $u'_2 = u_3$ ，依次类推，故上式成立。

因 $s'_1 = \frac{h_1}{\text{tgu}'_1}$ ， $s_2 \text{tgu}_2 = h_2 = s'_2 \text{tgu}'_2 \cdots \cdots$ ， $s_i \text{tgu}_i = h_i = s'_i \text{tgu}'_i$ 代入上

式则

$$f' = \frac{s'_1 \cdot s'_2 \cdots s'_i}{s_2 s_3 \cdots s_i} \quad (2-43)$$

对每个光组应用高斯公式，求出各自的物距和像距并代入上式即可求得等效光组的焦距，这种方法叫做截距算法。当然在计算过程中，得应用过渡式即前一光组的像即为下个光组的物。不管实物、虚物、实像、虚像都要服从各自光组的符号法则。

4. 各光组对等效系统光焦度贡献如何？

将式(2-42)组中的 tgu_i, \dots, tgu_i ；消去可得下式：

$$tgu'_i = \frac{h_1}{f'_1} + \frac{h_2}{f'_2} + \dots + \frac{h_i}{f'_i}$$

(或 $tgu'_i = h_1\phi_1 + h_2\phi_2 + \dots + h_i\phi_i$)

将上式代到(2-41)式，则：

$$\phi = \frac{1}{f'} = \frac{tgu'_i}{h_i} = \phi_1 + h_2\phi_2 + \dots + h_i\phi_i$$

如果取 $h_1 = 1$ 可得：

$$\phi = h_1\phi_1 + h_2\phi_2 + \dots + h_i\phi_i \quad (2-44)$$

显然，各光组对总光焦度的贡献除本身光焦度大小外，还与该光组在光路中所处的位置有关（因高度 h 随位置而异）。也就是具有一定光焦度的光组随所处的位置不同，对总光焦度的贡献是不同的。

七、怎样应用求基点公式？（以例说明）

例一：在焦距 $f' = 50\text{mm}$ 的标准镜头前加焦距 f' 等于 100mm 的近摄镜，求当两镜间距 d 值依次为 20mm 和 40mm ，求联合光具组的基点位置及焦距。

这里只用联合光组求基点公式求未知量

首先将已知量的值标在示意图 2-48 上，图中 表示近摄镜， 表示标准镜头。因为题目没给出两个透镜的厚度（可认为是薄透镜，故每个透镜的两个主面都重合。由(2-36)式： $x'_2 = -f_2 \cdot f'_2 / \Delta$ ， $x_1 = f_1 \cdot f'_1 / \Delta$ ，其中 $d = f'_1 + (-f_2)$ ，则 $\Delta = d - f'_1 + f_2$ （由图 2-36 可见，它可适合任意情况）或由下式求出焦点位置。由图 2-36 所示，并将上边各式及(2-36)式代入 l'_H 及 l_H 表示式则

$$l'_H = f'_2 + x'_2 + (-f'_2) = f'_2 - \frac{f_2 \cdot f'_2}{\Delta} + \frac{f_1 f'_2}{\Delta}$$

$$= \frac{f'_2(f'_1 + \Delta - f_2)}{\Delta}$$

$$l_H = \frac{f_1(f'_1 - f_2 + \Delta)}{\Delta}$$

如将 $\Delta = d - f'_1 + f_2$ ， $f_2 = -f'_2$ 代入上式则：

$$l'_H = -\frac{f'_2 d}{f'_1 + f'_2 - d} \quad (2-46)$$

$$l_H = \frac{f'_1 d}{f'_1 + f'_2 - d}$$

由(2-36)式求出的等效光组焦点位置是相对两个单光组焦点的距离；由(2-45)式及(2-46)式求出的主点位置是相对两上单光组主平面的距离。用哪个公式结果都是等效的。几何光学的公式都是代数式，在运算过程中将已知量的正负一定代入，除非强调某一式子中各量都是绝对值，才不必考虑符号。下边按(2-46)式计算：

$$d = 20\text{mm}$$

$$l'_H = -\frac{f'_2 d}{f'_1 + f'_2 - d} = -\frac{50 \times 20}{100 + 50 - 20} = -7.69\text{mm}$$

$$l_H = \frac{f'_1 d}{f'_1 + f'_2 - d} = \frac{100 \times 20}{100 + 50 - 20} = 15.38\text{mm}$$

计算结果说明等效系统的像方主平面在标准镜头(光组)主平面之左，距离为7.69mm处；等效系统物方主平面在近摄镜(光组)主平面之右距离为15.38mm处。

$$\begin{aligned} f' = -f &= -\frac{f'_1 f'_2}{\Delta} = -\frac{f'_1 f'_1}{d - f'_1 - f'_2} \\ &= -\frac{100 \times 50}{20 - 100 - 50} = 38.46\text{mm} \end{aligned}$$

计算结果说明等效系统像方主点在其像方焦点之左，距离为38.46mm处；物方主点在物方焦距之右相距38.46mm处。

$d = 40\text{mm}$ ，其它条件跟相同，则

$$f' = -f = -\frac{100 \times 50}{40 - 100 - 50} = 45.45\text{mm}$$

同理，计算得： $l'_H = -18.18\text{mm}$ ， $l_H = 36.36\text{mm}$ 。

从计算结果可知，加近摄镜后，系统的像方主点比没加之前向左移动了(跟标准镜头像方主点比)，同时随着两个光组间距的增加向前(向左)移动的愈显著。因此增加了像距(后主平面到曝光窗之间的距离)，如图2-49(a)与2-49(b)所示。在标准镜头前加近摄镜，可

拍摄较近物体并能获得较大的影像(因为， $\frac{s'}{s}$)。

两个光组的联合系统其等效焦距 f' 的值随两光组间距 d (或)的变化而异， d 值愈小， f' 值也愈小，当 d 趋于或等于0时，由式(2—

40(a))可知此时其焦距为 $\left(f' = -\frac{f'_1 f'_2}{-f'_1 - f'_2}\right)$ ；变

焦镜头就是通过改变组元间的距离(改变式(2-40(a))中的 d 值)实现变焦的。在标准镜头前加近摄镜可以使等效系统焦距小于标准镜头的焦距，因而可以近摄。

例二：用正切法和截距法求联合系统基点位置和焦距。设两光组都置于空气中且都是薄透镜， $f'_1 = -f_1 = 90\text{mm}$ ， $f'_2 = -f_2 = 60\text{mm}$ ， $d = 50\text{mm}$ (两者间距)。

正切算法(如图2-50所示)：

引一条与主光轴平行的入射光线，即 $\text{tgu}_1 = 0$ ，设 $h_1 = f'_1 = 90\text{mm}$ (因为入射高度是任意的，故可取方便于计算的值)，按(2-42)式则

有：

$$\operatorname{tgu}'_1 = \operatorname{tgu}_2 = \frac{h_1}{f'_1} = \frac{90}{90} = 1$$

$$h_2 = h_1 - d\operatorname{tgu}'_1 = 90 - 50 \times 1 = 40\text{mm}$$

$$\operatorname{tgu}'_2 = \operatorname{tgu}_3 + \frac{h_2}{f'_2} = 1 + \frac{40}{60} = \frac{5}{3}$$

因为此系统是由 2 个光组构成，故 $i = 2$ 。将所求得数据代到 (2 - 41) 式可求得像方基点位置为：

$$l'_F = \frac{h_2}{\operatorname{tgu}'_2} = \frac{40}{5/3} = 24\text{mm}$$

$$f' = \frac{h_1}{\operatorname{tgu}'_2} = \frac{90}{5/3} = 54\text{mm}$$

以上求出的是像方量，欲求物方量可将光具组前后颠倒求得的数值加负号即可。

截距算法 (如图 2 - 50 所示)

按高斯公式 $\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'}$ ，光线平行入射，即被摄物体在无穷远，此时

$s_1 = \infty$ ，则：

$$s'_1 = f' = 90\text{mm}$$

光组 的像即为光组 的物，所以：

$$s_2 = s'_1 - d = 40 \quad \frac{1}{s'_2} = \frac{1}{f'_2} + \frac{1}{s_2} = \frac{s_2 + f'_2}{s_2 f'_2}$$
$$\frac{1}{s'_2} - \frac{1}{s_2} = \frac{1}{f'_2} \quad s'_2 = \frac{s_2 f'_2}{s_2 + f'_2} = \frac{40 \times 60}{40 + 60} = 24\text{mm}$$

将两光组的物距及像距代到式 (2 - 43) 中即

$$f' = \frac{s'_1 s'_2}{s_2} = \frac{90 \times 24}{40} = 54\text{mm}$$

平行光线经过系统后的最后像点 s'_2 即为联合系统的像方焦点，再结合求得焦距 f' 的值及符号就可确定联合系统像方主点的位置。同理可求得物方量。

例三：欲获得一个对无限远物体成实像的系统要求 $f' = 1000\text{mm}$ ，筒长 $l = 700\text{mm}$ (从系统第一面到像平面的距离)，后截距 $l' = 400\text{mm}$ 。试求系统应有的结构。

题意 $f' > l$ ，而且是成实像的系统，凸透镜能成实像，但只要厚度不特别大时，主面不可能在系统前即不能使 $f' > l$ 。所以合题意的系统一定是联合光具组。为简便起见设两光组都是薄透镜。设它们像方焦距分别为 f'_1 和 f'_2 ，两光组间距离为 d 。如果求出 f'_1 、 f'_2 及 d 的值，所求系统的结构就算知晓。三个未知量，如果按联合光具组理论能列出三个方程式，通过解方程就可获得答案。依题意及式 (2 - 40(a)) 及 (2 - 38(a))，下列方程组成立：

$$\begin{cases} f' = \frac{f'_1 f'_2}{f'_1 + f'_2 - d} = 1000 \\ l' = l'_F = f' \left(1 - \frac{d}{f'_1} \right) = 400 \\ d + 400 = 700 (\text{即 } d + l' = 700) \end{cases}$$

解得

$d = 300 \text{ mm}$, $f'_1 = 500 \text{ mm}$, $f'_2 = -400 \text{ mm}$ f'_1 为正说明光组 是一正透镜; f'_2 为负值说明光组 是负透镜, 且两者相距 300 mm , 如图 2-51 所示。

例四: 在焦距为 500 mm 的光学系统前方或后方加焦距为 100 mm 的负透镜, 间距 $d = 40 \text{ mm}$, 求组合光具组的焦距, 及主点位置 l'_H 、 l_H 的值?

(1) 负光组在前, $f'_1 = -f_1 = -100$, $f'_2 = -f_2 = 50 \text{ mm}$, $d = 40 \text{ mm}$ 。由式 (2-40(a)) 及 (2-46) 则:

$$f' = \frac{f'_1 f'_2}{f'_1 + f'_2 - d} = \frac{-100 \times 50}{-100 + 50 - 40} = 55.56 \text{ mm}$$

$$l'_H = \frac{f'_2 d}{f'_1 + f'_2 - d} = \frac{50 \times 40}{-100 + 50 - 40} = 22.22 \text{ mm}$$

$$l_H = \frac{f'_1 d}{f'_1 + f'_2 - d} = \frac{100 \times 40}{100 + 50 - 40} = 44.44 \text{ mm}$$

(2) 正组在前 $f'_1 = -f_1 = 50 \text{ mm}$, $f'_2 = -f_2 = -100 \text{ mm}$, $d = 40 \text{ mm}$ 求: f' 、 l'_H 、 l_H 的值。

解: 由公式 (2-40(a)) 及式 (2-46), 则有:

$$f' = \frac{f'_1 f'_2}{f'_1 + f'_2 - d} = \frac{50 \times (-100)}{50 - 100 - 40} = 55.56 \text{ mm}$$

$$l'_H = \frac{f'_2 d}{f'_1 + f'_2 - d} = \frac{100 \times 40}{-100 \times 50 - 40} = -44.44 \text{ mm}$$

$$l_H = \frac{f'_1 d}{f'_1 + f'_2 - d} = \frac{50 \times 40}{50 - 100 - 40} = -22.22 \text{ mm}$$

从计算结果可见, 正负光组组合, 在两个光组间距及它们各自焦距不变条件下, 两个光组相对位置不同, 联合光具组的基点分布截然不同。如示意图 2-52(a) 与 (b) 可见: 负组在前时, 等效系统 (联合光组) 的像方主平面位于联合光组之后, 此种情况下, 有较大的后截距 (l' 值大)。具有这种特征的摄影镜头称为反望远型镜头。因为单镜头反光照相机, 有较大的后工作距, 所以它可以安装反远距型短焦距摄影镜头, 进行正常取景和拍摄; 正组在前时, 等效兴具组的像方主点前移到联合光具组之前, 以致于联合光具组的后焦距比镜筒还长, 具有这种性质的结构称望远型结构。一般长焦距镜头采用这种结构, 可使筒长减小三分之一。

在现代大地测量仪器及长焦距照相机中，多采用这种光学系统。

例五：求三片型照相物镜的基点位置和焦距。如图 2-53 所示，已知条件如表 2-1 所示。

表 2-1 例五已知数据

| 序号 | r (mm) | d (mm) | n |
|----|----------|----------|--------|
| 1 | 26.67 | 5.2 | 1.6140 |
| 2 | 189.67 | 7.95 | |
| 3 | -49.66 | 1.6 | 1.6475 |
| 4 | 25.47 | 1.0 | |
| 5 | 光栏 | 5.7 | |
| 6 | -25.00 | 2.8 | 1.6140 |

可见，此系统就不能作为薄透镜组来处理，必须把每一个球面作为一单光具组，故此系统就是由六个单光组构成的联合系统。欲求该系统的基点位置及焦距，用光具组理论中哪种方法都可以。下面再介绍一种常用的方法——近轴光的光路计算方法。

1. 什么叫近轴光的光路计算？

如图 2-3 所示，由 P 点发出入射于球面的光线与光轴的夹角 u 很小，其相应的 i, i', u 也很小，则这些角度的正弦值可以用弧度代替。这种光线很靠近光轴，所以叫“近轴光线”。光轴附近区域称为“近轴区”。对 $\triangle PAC$ 及 $\triangle PAC'$ 应用三角形正弦定律，并以弧度值近似其正弦值，再配合折射定律可得到下列一组公式：

$$i = \frac{s-r}{r} u$$

$$i' = \frac{n}{n'} i \quad (2-47)$$

$$u' = u + i - i'$$

$$s' = r + r \frac{i'}{u'}$$

由于在近轴区，所以图 2-3 中弧 AO 可以认为是直线以 h 表示，称为 A 点的入射高度（等于该点的出射高度）。由 $\triangle APO$ 和 $\triangle AP'O$ 可知：

$$\text{tg}(-u) = -u = \frac{h}{-s}$$

$$\text{tgu}' = u' = \frac{h}{s'}$$

则 $su = s' u' = h \quad (2-48)$

利用 (2-47) 式中各式及过渡公式 (2-48)，就可求出例五中最后一球面的像点 s_6 ，此点就是联合光具组的后焦点，如果再求出后焦距 f' ，则其后主点的位置就被确定。

2. 怎样进行近轴光的光路计算？

首先进行正向光路计算，取初始坐标：设 $s_1 = -s$ （即被摄物体的轴上点以平行于主轴的平行光束入射， $u_1 = 0$ ）并令 $h_1 = 10$ 。第一面

的入射角 $i_1 = \frac{h_1}{r_1}$ ，如图2-54所示，此种情况下， $i_1 = \varphi_1$ ， $\varphi_1 = \sin\varphi = t$

$g\varphi = \frac{h_1}{r_1}$ （因为是近轴区）。由（2-47）式中第一式有：

$$\frac{h_1}{r_1} = \frac{s_1 - r_1}{r_1} u_1$$

$$(s_1 - r_1)u_1 = h_1 = 10$$

具体计算过程如表：2-2 所示。由 S_6 确定焦点 F 位置 $l'_F = s'_6 = 67.4707$ 。按（2-41）式，其中 $h_1 = 10$ ， $tg u'_6 = 0.121869$ （查表 2-2）则有：

$$f' = \frac{h_1}{u'_6} = \frac{10}{0.121868} = 82.055$$

由图（2-36）可知

$$l'_H = l'_F - f' = -14.564$$

把系统倒转（原第一个面变为最后一个面；最后一个面变为第一个面），如表 2-3 所示。

$$l'_F = l'_6 = 70.0184$$

$$f' = \frac{h_1}{u'_6} = \frac{10}{0.121869} = 82.055$$

$$l'_H = l'_F - f' = -12.0366$$

上述结果是反向光路计算得到的数据，应把它们改变符号。这样系统物方基点位置及焦距为：

$$l_F = -l'_F = -70.0184$$

$$f = -f' = -82.055$$

$$l_H = -l'_H = 12.0366$$

以上计算结果如图 2-55 所示。

3. 在计算过程中为什么要列成表格？

从（2-47）各式可知：若知球面半径 r ，物距 s 和入射孔径角 u 由第一式可求得入射角 i ；已知物方和像方折射率（ n 与 n' 及 i ）用第二式就可求得折射角 i' ；由已知的 u 和所求出的 i 及 i' ，用第三式便可求得像方孔径角 u' ；用第五式则可求出该折射面所成像的位置 s' 。

怎样由一个折射球面过渡到下一个折射球面呢？如图 2-54 所示可知：前一面的出射孔径角恰是下个面的入射孔径角；前一面的像距跟两面的间距之差（ $s' - d$ ）便是后一面的物距。再重复用（2-47）式中各式就可求出该面的像距。依次类推就可求得最后一个折射面的像距，再由有关公式就能求得整个系统的基点位置和焦距。但如此孤立的运算，不利于检查运算过程的正确性。如果有错误，很难确定哪一步出了问题，但列表就不同了。

表 2-2 求三片型镜头基点的计算过程数据表

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------------|-----------|------------|-----------|------------|------------|-----------|
| s | - | 64.9065 | 38.2835 | 124.334 | -88.8593 | -592.073 |
| -r | 26.67 | 189.67 | -49.66 | 25.47 | 72.11 | -35.00 |
| s-r | 10 | -124.764 | 87.9435 | 98.8642 | -160.969 | -557.073 |
| × u | | 0.142640 | 0.200250 | 0.0608753 | -0.0921245 | -0.013899 |
| ÷ r | 26.67 | 189.67 | -49.66 | 25.47 | 72.11 | -35.00 |
| i | 0.374953 | -0.0938275 | -0.354626 | 0.236293 | 0.205617 | -0.221108 |
| × n/n | 1/1.6140 | 1.6140 | 1/1.6475 | 1.6475 | 1/1.6140 | 1.6140 |
| i | 0.232313 | 0.151432 | -0.215251 | 0.389293 | 0.127414 | -0.356869 |
| × r | 26.67 | 189.67 | -49.56 | 25.47 | 72.11 | -35.00 |
| ÷ iu = (u+i-i) | 0.142640 | 0.200250 | 0.0608753 | -0.0921245 | -0.0133919 | 0.121868 |
| s - r | 43.436488 | -143.436 | 175.594 | 107.629 | -661.383 | 102.401 |
| + r | 26.67 | 189.67 | -49.66 | 25.47 | 72.11 | -35.00 |
| s | 70.1065 | 45.2356 | 125.924 | -82.1593 | -589.273 | 67.4901 |
| su | 10 | 9.25827 | 7.66628 | 7.56888 | 8.18612 | 8.22501 |
| ÷ u | 0.142640 | 0.200250 | 0.0608753 | -0.0921246 | 0.0138919 | 0.121868 |
| s | 70.1065 | 46.2335 | 125.924 | -32.1593 | -589.273 | 67.4907 |
| -d | 5.2 | 7.95 | 1.6 | 6.7 | 2.8 | |
| s (下个面物距) | 64.9065 | 38.2835 | 124.334 | -88.3583 | -592.073 | |

表 2-3 反向运算过程数据表

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---------------------|----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| s | - | 89.2033 | 30.8823 | 235.146 | -173.722 | -184.662 |
| -r | + 35.00 | -72.11 | -25.47 | 49.66 | -189.67 | -26.67 |
| s-r | 10 | 161.313 | 56.3523 | 185.486 | 15.9485 | -157.992 |
| × u | | 0.108692 | 0.257985 | 0.0336528 | -0.0477363 | -0.0462093 |
| ÷ r | 35.00 | -72.11 | -25.47 | 49.66 | -189.67 | -26.67 |
| i | 0.235714 | -0.243148 | -0.570771 | 0.125697 | 0.00401391 | -0.273742 |
| × n / n' | 1/1.6140 | 1.6140 | 1/1.6475 | 1.6475 | 1/1.6140 | 1.6140 |
| i' | 0.177022 | -0.392441 | -0.346459 | 0.207086 | 0.00245693 | -0.441820 |
| × r | 35.00 | -72.11 | -25.47 | 49.65 | -189.67 | -26.67 |
| ÷ u' = (u + i - i') | 0.108692 | 0.257985 | 0.0336528 | -0.0477363 | -0.0462093 | 0.121870 |
| s' - r | 57.0033 | 109.692 | 262.160 | -215.431 | 10.2077 | 96.6883 |
| ÷ r | 35.00 | -72.11 | -25.47 | 49.66 | -189.67 | -26.67 |
| s' | 92.0033 | 37.5823 | 236.746 | -165.771 | -179.462 | 70.0183 |
| su | 10 | 9.69566 | 7.96717 | 7.91332 | 829232 | 8.53311 |
| × u' | 0.108692 | 0.257985 | 0.0336528 | -0.0477363 | -0.0462093 | 0.121870 |
| s' | 92.0033 | 37.5823 | 236.746 | -165.772 | -179.462 | 70.0184 |
| -d | 2.8 | 6.7 | 1.6 | 7.95 | 5.2 | |
| s (下个面物距) | 89.2033 | 30.8823 | 235.146 | -173.722 | -184.662 | |

从表 2-2 (或表 2-3) 可见：各折射面的诸物理量如入射角 i 、折射角 i' 、物方孔径角 u 、像方孔径角 u' 、物方折射率 n 、像方折射率 n' 、折射面的半径 r 等的数值及符号都一目了然。各物理量的关系都清清楚楚列入表中，同时每一格内各项运算结果，刚好是次一格第一项的值。以表中最左边各格为例加以说明。第一格中的 $s - r$ ，正是第二格中的第一项；第二格中各项运算结果正是第三格中的第一项 i (式 (2-47) 之一式)；第三格运算结果便是第四格中的第一项 (式 (2-47) 之二式)；第四格各项运算结果是式 (2-

47) 之四式的变形—— $s - r = r \frac{i'}{u'}$ ，其中 $u' = u + i - i'$ 是式 (2-47)

之三式， $(s - r)$ 则是第五格中第一项，第五格中各项运算结果恰是第六格中的 s ；第七格恰是通过式 (2-48) 来求像距 s' ，可以跟前边求得的 s 值进行比较，若两者相等，说明前边的计算过程无误；第八格中的 $(s - d)$ 就是下个折射面的物距，此面的 u 便是下个折射面的物方孔径角 u 。

总之，对实际光学系统进行近轴光路计算之所以要列表，一方面是方便校对计算是否正确，一方面也是为了便于用台式计算机或计算器进行计算。此种方法对于多个光组的系统比用光具组理论求基点位置及焦距要简单方便些。摄影镜头通常都是多个球面的共轴系统，因此用这种方法更为简单方便。

八、摄影中的无限远是什么意思？

“ ∞ ”是无限大的符号。物理学中常用的无限大跟数学中的无限大是不同的。

数学中的无限大 (∞) 不是具体的数，当然就不能跟很大的数混为一谈。数学中的无限大指的是变量 (因变量)，它比任意给定的无论多么大的数还大。

物理学中也常用无限大 (∞) 这个量，但通常指的是比较大的数，而且是相对的。象电磁学中的无限长直线电流的磁场，只要导线外 a 点处距导线的距离远远小于导线的长度时，该直线电流的长度就可认为是“无限长”。光学成像中的无限远同样具有相对意义。例如，摄影镜头的焦距决定着物与像的

比例 (横向放大率 β)。在照相机中，除显微摄影外，其余各种照相机横向放大率均小于 1。一般民用照相机其镜头焦距不外是 50 mm、75 mm 或 100 mm，有些有特殊用途 (摄远型) 的摄影镜头的焦距可达 500 mm 至 600 mm。一般摄影对象的物距 s 都比焦距大得多，因此像平面 (感光胶片) 总在像方焦平面附近。此时，就可以认为 s 为无限大 ($s = \infty$)，则 $1/s = 0$ ，利用高斯公式

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'}$$

$$s' = f'$$

例如用焦距为 50mm (标准镜头) 的照相机拍照几米远的景物 (或人)，其物距 s 就可以认为是无限远。

“无限远”轴上点的光束可认为是平行于主光轴的光束；轴外点的光束则可认为是斜平行（跟主光轴成一定夹角的）光束。

第五节 什么叫摄影镜头的光阑？

一、什么叫光阑？它有什么作用？

1. 什么叫光阑？

一个优良的摄影镜头除了要满足物像共轭位置及成像的横向放大率等要求以外，对成像范围也有一定要求。在像平面上要有一定的光能，常通过改变光圈的大小及曝光时间的长短来满足需要，其中光圈就是一种光阑。同时还要有一定的反映物面细节的能力，即镜头的分辨率（跟光束孔径成正比）。因此如何控制摄影镜头在成像范围内各点光束的大小是非常重要的。在摄影镜头中是通过特设的通光孔径来控制成像光束的大小，控制轴上点及轴外点光束大小的通光孔径叫做孔径光圈或有效光阑，即光圈；控制成像范围大小的通光孔径叫视场光阑；限制杂光的光阑叫消杂光光阑。

2. 光阑有什么作用呢？

光阑能改善摄影镜头的成像质量，因为光阑能限制成像光束孔径和成像范围，对不能成清晰像、准确像的那些光线和像不清晰的空间部分都要舍弃，对有害而无用的光也加以阻拦，故能改善像质量。

光阑也能控制摄影镜头的光功率、聚光本领和景深等。此外光阑还可以拦截摄影镜头系统中的杂散光等。

二、什么叫有效光阑？入射光瞳和出射光瞳？

1. 什么叫有效光阑？

摄影镜头通常都是复杂的透镜组，其中每一个透镜的边框都对轴上或轴外点光束的大小起不同程度的限制作用，故它们都是光阑，但起决定性限制作用的叫有效光阑。在普通照相机和电影摄像机上，通常专门设计有一个孔径光阑，即光圈，一般是由一组光圈片构成，该组光圈叶片共同形成一个通光孔，光孔与镜头主轴垂直，其中心位于主轴上。调节镜头光圈调节环，可以改变其光孔的大小，所以光圈又可称为可变光阑。

2. 什么叫入射光瞳和出射光瞳？

一般孔径光阑都设在镜头的透镜组中间，它通过前面透镜组在物空间形成的像叫入射光瞳，故孔径光阑与入射光瞳（简称入瞳）对其前边光组而言是共轭的；孔径光阑对其后边的透镜组的共轭叫做出射光瞳，简称出瞳。入瞳和出瞳对整个镜头是共轭的。

3. 不同条件下，入瞳和出瞳的位置有什么不同？

例一：图 2-56 是一个凸透镜构成的光学系统。在此种情况下，透镜的边框就是孔径光阑，它前后又都设有光组，所以这个边框既是入瞳又是出瞳。入瞳的边缘对物点 P 的张角 u 叫做最大入射孔径角；出瞳的边缘对像点 P 的张角叫最大出射孔径角并以 u' 表示之。从图中可以看出，一定位置一定大小的孔径光阑，对轴上不同点所张的最大孔径角将是不同的。

例二：在凸透镜前或后分别另设一孔径光阑。图 2-57(a)所示为在

凸透镜前设置孔径光阑的示意图。在摄影镜头的发展史上，第一个摄影镜头就是由一个凹凸（凹面朝前的新月形的）透镜及位于前边的光圈组成。为简单起见，图中画为薄透镜。图中 DD 前边没有透镜，也就不能对它成像，可以说像就是它本身，因此它即是孔径光阑同时又是入瞳；它对后边透镜在像空间成的像 $D'D'$ 就是该摄影镜头的出瞳。入瞳和出瞳的边缘对物点与像点的张角便是入射孔径角和出射孔径角。

图(b)所示则为富士一次性相机的镜头（塑料镜片）示意图，实际它是由一个凸面朝前的（凸凹）会聚透镜及后边的光圈组成。为简单起见，图中以薄透镜表示。光圈 $D'D'$ 对前边透镜在物空间成的像 DD 便是入瞳，入瞳对物点的张角为入射孔径角（或叫物方孔径角）； $D'D'$ 本身就是孔径光阑跟出瞳二合一。它对像点张的角为出射孔径角或像方孔径角。

例三：如图 2-58 所示，是一种对称摄影镜头。为减小像差，大多数现代摄影镜头大都采用对称或亚对称型结构。为简单图中只以一对对称透镜表示。孔径光阑就放在中间。 DD 和 $D'D'$ 分别是孔径光阑 D_0D_0 的入瞳和出瞳。 DD 是以 D_0D_0 为物对它前边透镜 I_1 在物空间成的像，这个像 DD 对物点 P 的张角或者说 PD 跟物方光轴的交角 u 就是入射孔径角； $D'D'$ 则是以 D_0D_0 为物对它后边透镜 I_2 成的像， $P'D'$ 跟像方主光轴的交角 u' 就是出射角。因为 DD 和 D_0D_0 是对 D_0D_0 之前的 I_1 共轭，而 D_0D_0 和 $D'D'$ 是对 D_0D_0 之后的透镜 I_2 共轭。所以这就保证了通过 DD 边缘的入射线经 I_1 折射后，一定通过 D_0D_0 的边缘；再经过 I_2 折射后，出射线一定通过 $D'D'$ 的边缘。入瞳和出瞳对整个镜头是共轭的。

4. 孔径光阑及其瞳对轴外点有什么作用？

从以上几个例子可知，孔径光阑及其瞳，它们决定着轴上点的入射孔径角和出射孔径角的大小，也就是决定着轴上点通过镜头的光通量的多少。它们是通光孔，是光的必由之路，因此对轴外点的光束也起一定的限制作用，换句话说，轴外点的光束必须通过它们后才能到达像面或成像。具体作用后边再介绍。

5. 为什么要引入瞳的概念？

孔径光阑跟瞳在限制光束的作用方面是等效的，为何不直接用孔径光阑作孔径角呢？

由图 2-58 所示可见，虽然 u 及 u' 的大小是由孔径光阑 D_0D_0 决定的，但却不是 D_0D_0 对 P 与 P' 的直接张角。因为 D_0D_0 与 P 不在同一空间。 D_0D_0 对发自 P 点光束的限制须通过在它前边的光组 I_1 的折射起作用，即直接确定物方孔径角 u 是以孔径光阑 D_0D_0 为物，通过在它前面的光学系统 I_1 ，在物空间所形成的像 DD （入瞳）直接对物点 P 的张角。同样出射孔径角是孔径光阑对它后边的光具组 I_2 在像空间的像（出瞳）直接对像点 P' 的张角。

6. 对称型摄影镜头的瞳有什么特点？

如图 2-58 所示，如果 I_1 与 I_2 完全对称于孔径光阑时，则入瞳和出瞳的大小，倒正及虚实都完全一样。即入瞳和出瞳所在的面为放大率为正一的面，也就是入瞳面跟摄影镜头物方主平面重合，入瞳中心跟物方

主点重合；出瞳面跟像方主平面重合，出瞳中心跟像方主点重合。如摄影镜头置于空气中，则物方与像方的主点、节点，光瞳中心三者重合。

7. 入瞳和出瞳有什么作用？

在讨论实际通过光具组的光束顶角大小时，根本不用作出孔径光阑，只要作出入瞳和出瞳，正确地表示它们的位置和大小，把它们边缘所有的点分别和物点及像点用直线连接起来，就得到所求光束顶角的大小，如图 2-59 所示。有了光瞳，实际的有效光阑就变得次要了，在作图时可以不用它。至于要确定像点 P' 的位置，如要用联合光组作图求像时，光束的角度不受最大孔径角的限制。一般在设计摄影镜头时，基点、基面、光瞳的位置都是已知的，但也都是抽象的。简便方法不需画出摄影镜头的实际结构，就能在一定条件下基本解决复杂镜头所成像的位置、光束顶角的大小问题。而且光组最前和最后两个界面以外的光束将完全跟实际相符合。

三、什么叫视场光阑？什么叫入射窗和出射窗？

1. 什么叫主光线？

孔径光阑能限制轴上点成像光束的大小，同时它对摄影镜头的聚光本领及景深等都有重要作用；对轴外点的光束也有限制作用，但它不能限制轴外点的范围。根据高斯光学中，近轴物在近轴光线条件下，能成理想像。但物点距轴越远，光束越宽所成的像对理想像偏离越大。为了获得清晰像，对景物的范围必须加以限制。用来限制被摄物平面范围的通光孔叫做视场光阑。如图 2-60 所示，入瞳和出瞳中心 O 与 O' 对整个光具组是共轭的，为方便起见光具组及孔径光阑都没画出，若入射线通过 O ，则出射线必通过 O' 。 A 是轴外一物点，与像平面上 A' 共轭。在以轴外点 A 与 A' 为顶点的光束中，通过 O 和 O' 的那对共轭光线 AO 和 $A'O'$ 分别叫做物方和像方主光线。

2. 什么叫视场光阑？

如上图所示可知：随着 A 和 A' 点离主光轴距离的增加，主光线通过镜头时就会与某个通光孔的边缘相遇，离光轴更远的共轭点，它们的主光线就会被这个光孔遮断，这样的通光孔就叫做视场光阑。

3. 什么叫视场？

如图 2-60 所示，被通过视场光阑边缘的主光线 AO 和 $A'O'$ 所限定的物平面和像平面的范围，分别叫做物方视场和像方视场，当被摄物体离镜头为有限远时，常用物高表示视场的大小，在摄影中常把胶片景像所包括原面积叫做镜头的视场，一般多用能成清晰像的底片尺寸来表示视场。将视场边缘（底片边缘）跟镜头的后节点（通常跟后主点及出瞳中心重合）形成的夹角叫视场角。当被摄物体在无限远时，常以视场角的大小表示视场。

4. 什么叫视场角？

如图 2-60 所示，被过视场光阑边缘的主光线 AO 和 $A'O'$ 所限定的空间立体角 2θ 和 $2\theta'$ 分别叫做物方视场角和像方视场角。在摄影中将像方视场边缘与镜头的后节点所形成的夹角叫视场角，两者是统一的。

因为镜头大都是对称或亚对称型结构，又置于空气中，故后节点跟出瞳中心是重合的。在摄影中又常把视场角分为：对角线视场角、水平视场角和垂直视场角。

什么叫对角线视场角？如图 2-61 所示，底片画幅对角线对摄影镜头像方节点的张角叫做对角线视场角。若画幅对角线长为 l ，后节点为 k ，后焦距为 f' ，对角线视场角 $2w'_{\text{对}}$ 的表示式为

$$2w'_{\text{对}} = 2\text{tg}^{-1} \frac{l}{2f'} \quad (2-49)$$

什么叫水平视场角和垂直视场角？

如图 2-62 所示，设置于空气中镜头后焦距为 f' ，后节点为 k ；画幅水平宽度为 a ，垂直高度为 h 。水平视场角是画幅上过主轴的水平线两端对后节点的张角以 $2w'_{\text{水}}$ 表示，则：

$$2w'_{\text{水}} = 2\text{tg}^{-1} \frac{a}{2f'} \quad (2-50)$$

垂直视场角是画幅上过主轴垂直线两端对后节点的张角，以 $2w'_{\text{垂}}$ 表示，则：

$$2w'_{\text{垂}} = 2\text{tg}^{-1} \frac{h}{2f'} \quad (2-51)$$

通常摄影镜头的对角线视场角，水平视场角和垂直视场角都是已知的。因此拍摄前就可以估算出欲拍摄处多大范围的景物可以收进画幅内。

例：已知普通 135 相机的镜头基焦距为 50 mm，调焦平面的物距为 2m，求该镜头的水平视场角和垂直视场角及调焦平面处所能拍摄下的景物范围：水平宽度和垂直高度。根据 (2-50) 及 (2-51) 式求得 $2w'_{\text{水}} = 39^\circ 35'$ ； $2w'_{\text{垂}} = 26^\circ 59'$ ，根据节点的性质（过两个节点的共轭线平行）可知，物高对物方节点的张角等于像方垂直视场角；物方水平视场角等于像方水平视场角及上边的计算结果，从式 (2-50) 中解出 a ，从式 (2-51) 中解出 h 。故物高 = 0.96m，物宽 = 1.44m。

5. 什么叫入射窗和出射窗？

摄影镜头中通常都特设一个视场光阑。视场光阑对它前边的透镜组在物空间成的像称为入射窗；对它后边的透镜组在像空间成的像称为出射窗，因此视场光阑跟入射窗对其前边透镜组而言是共轭的；对其后边透镜组则它与出射窗共轭；对整个镜头来说，入射窗和出射窗是共轭的。引入窗的意义在于配合光瞳确定镜头的视场角。

摄影镜头中的孔径光阑通常都设在镜片中间，而视场光阑常设在像平面上，如图 2-63 所示。

此图为照相机光学结构示意图，为简单起见以一个薄透镜表示镜头，则透镜的边框就是孔径光阑兼入瞳和出瞳；视场光阑就是像平面上的底片架的内边框，它后边没有透镜，故它本身即是视场光阑又是射窗，它对前边透镜的共轭像即入射窗（必然在物平面内）。

从图可见，用瞳和窗确定视场角是很方便的。入射窗的边缘对入瞳

中心 O 的张角 2θ 即为物方视场角，出射窗边缘对出瞳中心 O' 的张角便是像方视场角。

6. 什么叫渐景？

以上讨论的前提是在入瞳非常小的条件下，由入射窗的大小就可以完全确定摄影镜头的成像范围。但当入瞳有一定大小时，入射窗就不能完全确定视场了。又因为入瞳跟出瞳对整个镜头是共轭的，故通过入瞳的光束也一定能通过出瞳；入射窗跟出射窗对整个镜头也是共轭的，所以能通过入射窗的光束也必然能通过出射窗。为简化问题，我们只分析物空间的光束限制情况，如图 2-64 所示。图中略去了镜片组，只示出了入瞳 $O_1 - O - O_2$ 、入射窗 $N_1 - N - N_2$ 及物平面。以物平面上点为顶点的光束，只有同时通过窗和瞳的部分才能到像平面参与成像。在物平面上按其成像光束孔径不同可分成三个区域。

图中所示是以 P_1P 为半径，以 P 点为圆心的半圆形区（半视场），在这个区域内每一个点都以充满入瞳的全部光束成像。其对应的是像方画幅中心部分，像最清晰。这区域边缘点 P_1 是由入瞳下边缘 O_2 跟入射窗下边缘 N_2 的连线决定的。

第二个区域是以 P 点为圆心，分别以 PP_1 和 PP_2 为半径的半环形区域，这个区域中的各点已经不能用充满入瞳的光束成像。这个区域 P_2 为边缘点，它是由入瞳中心 O 及入射窗下边缘 N_2 连线决定的。在会轴面内考查光束，由 $P_1 \sim P_2$ 区域内的各点，能通过入瞳的光束截面积由 100% ~ 50%，不过是逐渐减小的，对应的像面是逐渐变暗的，这种现象叫做渐景。

第三个区域是以 P_2P_3 绕光轴旋转一周的环形区域， P_3 点是由入瞳上边缘 O_1 跟入射窗下边缘 N_2 连线决定的，在这个区域内，渐晕程序由 50% ~ 0， P_3 以下各点的光束根本不能达到像平面，故不能成像， P_3 是能成像的最边缘点，对应的像点最暗。

如果入瞳为无限小时，入射窗边缘对入瞳中心的张角所限定物平面的范围就是物方视场，就是图中的 P_2 （视场边缘点）点限定的区域；但是当入瞳有一定大小时， P_2 点以外的一些点，虽然其主光线被入射窗拦阻不能通过，但光束中还有主光线以上的一小部分光线可以通过入射窗，被系统成像，故成像范围扩大了。图中 P_3 点才是被系统成像的最边缘点，因由 P_3 点发出的充满入瞳的光束中还有最上面一条光线能通过入射窗。

实际由 P_1 至 P_3 的渐晕是逐渐变化的，本来没有明显界限，所以上述区域的划分是人为的。

光束是光能的载体，通过的光束越宽，它所携带的光能就越多，故与第一个区域共轭的像面照度最大且均匀；从第二个区域开始对应的像面上的照度逐渐由 100% 降为 0。7. 光阑的位置跟摄影镜头的孔径有什么关系？如图 2-65 所示，当对焦平面也就是被摄物体 PQ 跟镜头 I 的位置一定时，光阑处于 1 或 2 不同位置时，对应的镜组 I 的孔径是不同的。

光学系统中的光阑位置原则上是可以任选的，但须要选取恰当的位

置，才能改善轴外点成像质量。就轴外点宽光束而言，光阑位置不同，就等于在光束中选择不同部分的光束参与成像，即可以选择成像质量较好的那部分光束。如图所示，光阑位于 1 时，轴外点 Q 以光束 QM_1N_1 成像；光阑位于 2 时，轴外点 Q 以光束 QM_2N_2 成像，故可挡住成像质量差的部分光束。

当改变光阑位置时，如果也相应的改变通光孔的大小，以保持轴上点孔径角不变。在保证成像质量前提下，合理选择光阑位置，就能使整个镜头系统零件尺寸减小，系统结构匀称。由图可见，光阑在位置 2 时比在位置 1 时所需透镜孔径要小。

四、什么叫消杂光阑？

只限制那些不是成像物体射来的光束的光阑叫消杂光阑。如光学系统的各折射面的反射光、仪器内壁的反射光等，这些无用反而有害的光称为杂光。杂光如果不加以限制就会进入光学系统到达像面，从而使像面产生明亮背景，降低衬度，影响像的清晰度，是很有害的。所以一些重要的仪器（包括相机镜头）都专门设置消杂光阑，它能消阻杂光，但它不限制通过光学系统的成像光束。一般的光学系统中，常把镜筒内壁加工成内螺纹，并涂以黑色无光漆或者墨用来消杂光。

五、成像系统中的光阑如何设置？

成像系统的种类很多，如普通摄影镜头，望远系统、显微系统、投影系统（幻灯、电影放映机、放大机等）它们的光阑位置并不相同，下边仅以几个实例略加说明。

1. 普通摄影镜头中瞳和位置如何？

图 2-66 所示的是六片四组亚对称的、比较高级的双高斯型摄影镜头的光学系统示意图，在中心附近特加一个光圈 D_0D_0 ，在像面上特加一个底片框 AB。这个系统中有：1、2、3、4 四个镜组的边框，外加特设两个光阑计六个通光孔（光阑），其中在限制轴上点孔径大小中起决定作用的是 D_0D_0 ，所以它就是有效光阑。限制视场大小起决定性作用的是 AB，所以它叫视场光阑。其它光阑对光束的限制程度不同，都不起决定性作用。

一般通过改变光圈孔径大小来控制通过镜头的光能量。 D_0D_0 通过它前面的镜组 1 和 2 在物空间的虚像 DD 便是入瞳；通过它后面的镜组 3 和 4 在像空间成的虚像 D D 便是出瞳。通过入瞳和出瞳中心的光线就分别是物方主光线和像方主光线（在镜组中的部分用虚线表示）。

视场光阑 AB，它后边没有镜组，所以它本身又兼为出射窗。因为入射窗跟出射窗对整个光学系统是共轭的，所以入射窗必位于物平面上。

2. 望远系统中的瞳和窗的位置如何？

什么叫望远系统？

望远系统是两个光组的结构如图 2-67(a)所示，其光学间隔为零， F_1' 和 F_2 重合，因此跟主光轴平行的入射光束，经系统折射后的出射光束仍

然跟主光轴平行；跟主光轴成一定角度的斜平行光束，经过系统折射后出射光束也仍然是斜平行光束（但两者跟主光轴的夹角不同）。这时这个望远系统作为一个联合光具组是没有焦点的，故又叫做无焦系统。望远镜就是无焦系统，天文望远镜其物镜和目镜的光学间隔为零；当用在观看有限远物体时，如大地测量观测用的望远镜或观剧望远镜等，这两系统的光学间隔虽不为零，却也很小，可作为一般研究，仍然可以把它们当成是无焦系统或望远系统。

望远系统的瞳和窗位置如何？

图 2-67(b)所示就是望远镜的瞳和窗的示意图。为简单起见把物镜与目镜都看作是薄透镜。物镜的边缘就是孔径光阑兼入射光瞳，物镜的光心就是入瞳中心；孔径光阑对目镜的共轭就是出射光瞳，出射光瞳位于目镜的后边（后焦点附近），离最后一个折射面不远的地方，通常是目镜镜筒的终端。望远镜的视场光阑 D_0D_0' 就放在中间像的位置，也就是 F_1' （或 F_2 ）的位置。因为被望远镜观测的物体在无限远处，经物镜成的像叫中间像，它就位于物镜的后焦平面（也就是目镜的前焦平面）上。 D_0D_0' 对物镜的共轭就是入射窗，入射窗 DD' 必然跟无限远的物平面重合； D_0D_0' 对目镜的共轭 $D''D'''$ 必然跟无限远处的像平面重合。出射窗边缘对出瞳中心的张角 就是视场角。

如果将用望远镜观测到的景物拍摄下来，那就是望远镜摄影。

3. 显微系统的瞳和窗位置如何？

什么叫显微系统？

显微镜的光学系统就是显微系统。它跟望远系统的相同之处是：都是由物镜和目镜两个光组构成的联合光具组。不同之处是：(a) 被观测对象远近和大小不同，望远镜观测的是远而大的物体；显微镜观测的则是旁轴小物。(b) 物镜和目镜的光学间隔不同，望远镜的光学间隔为零；显微镜的光学间隔不为零。(c) 物镜的焦距大小不同，望远物镜是长焦距的；显微物镜是短焦的。(d) 两者成像的大小不同，望远镜成的像是横向放大率小于 1 的像，但视角放大率却大于 1，也就是说望远镜放大的是视角，看起来物体虽没被放大但却被拉近了；显微镜观测到的是横向放大率大于 1 的像。以上是主要的不同点。图 2-68 所示就是显微系统光路示意图。

物镜和目镜的间隔比它们各自的焦距大的多。被观测物体 QP 放在物镜物方焦点外侧附近，它经物镜成放大实像 Q_1P_1 于目镜物方焦点内侧附近，再经目镜成放大的虚像 Q_2P_2 于明视距离以外。显微摄影，调节光学间隔大小使中间像 Q_1P_1 位于目镜的物方焦点外侧附近， Q_1P_1 通过目镜再次成放大实像 Q_2P_2 ，在 Q_2P_2 处放胶片就可以进行拍摄。

显微系统的瞳和窗位置如何？

对于低倍显微镜，物镜的边缘就是孔径光阑兼入射光瞳；比较复杂的显微物镜，孔径光阑常设在它的后面，且靠近或者就在它的像方焦平面上，因此入瞳趋于无限远。无论哪种显微镜都跟望远镜一样：物镜（或孔径光阑）到目镜的距离都比目镜的焦距大得多，所以整个仪器的出瞳（孔径光阑对目镜成的像）都近似地在目镜的像方焦面附近。无论对于

哪种目镜，它都在最后一个折射面之后不远的地方。通常都在目镜镜筒终端，眼睛观测之处。

显微镜（无论是低倍或高倍）的视场光阑跟望远镜的视场光阑位置相同——中间像的位置。因此视场光阑对物镜的共轭像的位置就是入射窗的位置，必然在物平面上；视场光阑对目镜的共轭像必定在最后的像面处，也就是出射窗所在之所。

4. 投影系统的瞳和窗位置如何？

什么叫投影系统？

投影仪器就是投影系统。电影机、幻灯机、印相放大机及绘图用的投影仪等都属投影仪器。它的主要部分是一个会聚的投影镜头，将画片（或电影胶片，要放大的底片，幻灯片等）放大成实像于屏幕上（或放大相纸上）。通常镜头到像平面（幕式放大相纸）的距离即像距 s 比镜头的焦距大得多（ $s \gg f$ ），所以画片（物）总在焦距附近即 $s \approx f$ 。跟普通摄影刚好相反，普通摄影时是物距比焦距大得多，像距近似等于焦距。

投影仪器主要构造除成像镜头外，还有聚光系统，它的安排原则应有利于幕上得到尽可能强的均匀照明。通常聚光器有两种类型。(a)适用于画片面和较小的情况，这时聚光镜将光源的像成在画片上或它的附近。(b)适用于画片面积较大的情况，这时聚光镜将光源的像成在投射镜头上。图 2-69 所示的聚光器是属(b)的情况。

图中 D 为光源，为简单画出一一点，光源通常是电弧或功率：很大的白炽灯泡；M 是由两个平凸透镜组成的聚光器；L 是照相（或叫投影物镜），它把被照明的画片 AB 成像在幕上（A' B'）。从聚光器出来的光束会聚于照相物镜的入瞳的中心 O，光束对画片框的张角 θ 决定了屏幕上的成像范围。

投影仪器的瞳与窗的位置如何？

投影器的镜头是对称型结构，把孔径光阑设在镜中间，也就是镜头的边框就作为孔径光阑。此种情况下，孔径光阑、入瞳、出瞳是三位一体的。把 AB 的片夹就作为视场光阑，这时它又是入射窗，它对镜头的共轭——出射窗就位于银幕（或照相放大纸上）。

六、为什么入射窗要位于物平面？出射窗要位于像平面？

从上述几个实例知道，视场光阑位置的选择原则是想方设法使其入射窗位于物平面内；令其出射窗位于像平面内。因为在入瞳为无限小时，入射窗的边缘对入瞳中心的张角所决定的视场内没有渐晕现象。下边讨论当入瞳有一定大小时，也可以不存在渐晕的条件。如图 2-70(a)所示。设入射瞳直径为 $2a$ ， $-l$ 为入瞳到物平面的距离， $-l$ 表示入瞳到入射窗的距离（都以入瞳中心为坐标原点）。图中 $P_1P_3N_2$ 和 $O_1N_2O_2$ 相似，所以下边关系成立：

$$\frac{-P_1P_3}{2a} = \frac{e-l}{-e}$$

由上式可知，欲使渐晕 $P_1P_3 = 0$ ，式中的 $2a$ 及 e 都不为零则；

$$e - l = 0$$

$$e = l$$

即入射窗和物平面重合或者像平面和出射窗重合（通过像空间量的讨论可知）。此时就不存在渐晕现象，因为此时视场光阑已不起拦光作用了。实际中只有单组的光学系统，像低倍显微镜、望远物镜、投影物镜等，常不另设孔径光阑，物镜本身就是孔径光阑和入瞳，并且满足入射窗和物平面重合的条件，才能无渐晕地成像。但是当光学系统中透镜较多，例如复杂的照相机镜头（透镜较多，且孔径都不大），就是物平面跟入射窗重合，就算视场光阑不起拦光作用，但其它透镜的框子仍可能拦光而造成渐晕。这种情况通过下述实验可以观察到。

把摄影镜头安装在一很大的伸缩暗箱前端，并在该暗箱后端安装一块很大的磨砂玻璃。当将摄影镜头的光圈开至最大，并对无限远景物调焦时，在磨砂玻璃上可以看到：被镜头成像的景物影像都在一圆形面积之内，圆形之外则漆黑，无有影像。在影像区域的中心区影像特别清晰，这就相当于图 2-70(a)中物平面上 PP_1 部分；在清晰区边缘跟无影区之间的圆环形区域内，其影像较模糊，这就相当 2-70(a)图中 P_1P_3 部分（渐晕区）；当光圈逐渐缩小时，可以看到中心清晰影像区域逐渐向外扩大。在实验过程中视场光阑（底片夹，即曝光窗）并没加入，但仍有渐晕现象产生，这就足以说明各镜片框有拦光作用。不过当曝光窗的内孔小于光圈最大时的清晰影像区域，曝光窗——视场光阑兼出射窗，它就有决定性地拦光作用，在正常摄影时底片内不会有显著的渐晕现象。

第六节 什么叫摄影镜头的景深？

一、什么叫摄影镜头的平面空间像？

1. 什么叫摄影镜头的平面空间像？

前面讨论的只是在垂直于光轴的平面上点的成像问题。在实际中属于这类成像情况的摄影镜头有照相制版镜头和投影仪器的镜头（幻灯机、电影放映机、映谱仪、印像放大机等）。而一般的摄影都是把三维空间的景物成像于底片上，这种情况下底片上的像叫做平面上的空间像。

2. 什么叫景深？

底片上能成空间景物清晰平面像，景物的轴向范围叫做景深。理想光具组理论指明，物空间与像空间是点对点、面对应，当像距确定之后，与像平面共轭的物平面是唯一的，这个高斯面就叫做对准平面；与其共轭的像平面（如底片）就叫做景像平面。如图 2-70(b)所示， P_1 与 P_2 分别是对准平面前与后边平面上的物点，跟它们共轭的像点 P'_1 与 P'_2 分别在景像平面的前与后边的像平面上，被景像平面（底片）所截到的一般是一圆斑，这圆斑可以看做是空间物点在底片上的像，若圆斑的线度小于底片能够分辨的最小距离时，就可认为它们在底片上的像是清晰的。对于一定的入瞳，只有对准平面前后一定范围内的物点，在底片上形成的光斑才会小于这个限度。由图可见，入瞳越小，光斑就越小，物点的允许范围就会增大。物点这个可允许的前后（也就是轴向）范围就是摄影镜头的景深。

3. 如何做出空间点在景像平面上的像点？

为简单起见设摄影镜头为对称型结构（实际上这种结构很普遍），故入瞳中心 O 跟物方节点重合，像方节点跟出瞳中心 O' 重合，过节点的一对共轭线是平行的，过光瞳中心的共轭线分别叫做物方主光线和像方主光线，则它们必互相平行。

求空间物点的理想像点的位置：过空间物点作物方主光线，如图 2-70(b)中的 P_1O' 和 P_2O ；确定理想像面的位置（根据高斯或牛顿物像公式）；求理想像点位置：过 O' 作 $O'P_1 // OP_1$ 、 $O'P'_2 // OP_2$ ，它们与各自的理想像面交于 P'_1 与 P'_2 点，则 P'_1 与 P'_2 就是所求的理想像点。

求空间物点在底片（景像平面）上的像点：(a)如图 2-70(b)所示，以出瞳中心 O' 为投影中心，沿像方主光线方向向景像平面投影所得投影点（即像方主光线跟底片的交点）就是空间物点在景像平面上的像点；(b)以入瞳中心 O 为投影点，将空间物点沿物方主光线方向，向对准平面上投影，所得的投影点在景像平面上的共轭点就是空间像点。总之空间点在景像平面上的像实际是其投影。

求空间点在景像平面上光斑的大小：以理想像点 P'_1 与 P'_2 为顶点跟出瞳边缘点连线的充满出瞳的光束，其边缘线跟影像平面的相交的范围就是光斑的大小。或者由空间物点发出充满入瞳的光束跟对准平面交为光斑，再求其在景像平面上的共轭即为所求。由图可见物方和像方的光斑的大小跟入瞳和出瞳的大小有关，当它们比较小时，景像平面上

的光斑也较小，则可认为空间点在景像平面上的像是清晰的。

4. 什么叫景像畸变？

上述情况说明，物空间各空间点的成像，相当于以入瞳中心为投影中心，以主光线为投影线，把空间各物点投影到对准平面上以后，再成像于景像平面上；或者在像空间以出瞳中心为投影中心，各空间像点沿主光线投影到景像平面上就是空间点的平面像。当入瞳相对于空间各物点位置发生变化时，则景像也随之变化，如图 2-71 所示(a)与(b)是相同的景物，只是入瞳相对于景物的位置不同，两空间物点的平面像情况是不同的，图(a)所示 s_1 与 s_2 是分开的，而(b)所示 s_1 与 s_2 是重合的，在投影中心作前后移动时，投影像的变化跟景物不成比例，这种现象称为景像畸变，或叫透视失真。

例如用广角镜头拍照时，离主光轴越远的空间点的平面像畸变越显著。如图 2-72(a)所示，设空间物体为一球状体，它对入瞳中心的投影线为圆锥形。锥形的顶点是入瞳中心，锥形的边缘线是过球体的各个边缘点的主光线，过球心的主光线为圆锥形射线束的轴线，这圆锥形射线束的共轭射线束亦为圆锥形，其作法如下：过出瞳中心作各边缘线的平行线，这些平行线跟景像平面的交点就是球体各边缘点的平面像。在景像平面上的锥形光束截面呈椭圆形，这就是景像畸变。

图 2-72(b)所示，设被广角镜头拍摄的是一系列球体，每个球体成像过程跟图(a)相同。此图中只画出了各球体物方和像方的轴线，每个像方圆锥轴线以不同角度交于像平面，其最大角度 w_1 为半视场角。从图可见，景像平面上的锥形光束截面（空间球体的平面像），将随着 w 的不同而不同。虽然各球体中心距物方主点的水平距离（物距）都相同，但与入瞳中心 O 的位置（轴线跟主光轴交角）不同，畸变程度就不同，角越大畸变越严重。

二、底片上的弥散斑的大小跟空间点位置有什么关系？

前边讨论的空间点成平面像的问题，景像平面上的像，根本不是点而是光斑（圆形、椭圆形等），这光斑也叫弥散斑。只有当弥散斑的线度小于接受器（眼睛或底片）能够分辨的最小距离时，弥散斑才可以认为是个点，即像是清晰的。弥散斑的大小跟许多因素有关（光瞳的大小空间点距光瞳的距离，透视距离等）。首先推导弥散斑大小跟空间点位置的关系。

1. 什么叫前景？什么叫后景

图 2-73 给出了摄影镜头的对准平面，光瞳位置及大小，景像平面的位置； B_1 与 B_2 分别为对准平面前与后边的点；物方线量均以入瞳中心 O 为坐标原点（在其左为负，居其右为正）；像方量都以方瞳中心 O' 为坐标原点，符号法则同上。

能成清晰像的最远平面称为远景，能成清晰像的最近平面称为近景。如图所示，它们离对准平面的距离分别以 s_1 和 s_2 表示，称为远景深和近景深，显然景深等于远景深和近景深之和，若以 s 表示景深则：

$$s = s_1 + s_2$$

2. 光斑大小跟光瞳直径和空间点的位置有什么关系？

如图 2-73 所示：物方量： B_1 与 B_2 分别为远景平面与近景平面上的任意点，以 B_1 与 B_2 为顶点作充满入瞳的光束，其在对准平面上投影光斑的直径分别为 z_1 与 z_2 ；远景平面，对准平面，近景平面到入瞳的距离分别为 $-p_1$ 、 $-p$ 、 $-p_2$ 。像方量： B_1 与 B_2 的像分别在远景平面与近景平面的共轭面上的 B_1'' 与 B_2'' 点上；以 B_1'' 与 B_2'' 为顶点的充满出瞳的光束在景像平面的投影光斑直径分别为 z'_1 与 z'_2 ；远景平面、对准平面、近景平面的共轭面到出瞳的距离分别以 p'_1 、 p' 、 p'_2 表示，设入瞳的直径为 $2a$ 。

因为景像平面上的弥散斑是对准平面上弥散斑的像，设对准平面与景像平面的横向放大率为 β ，则：

$$z'_1 = \beta z_1$$

$$z'_2 = \beta z_2$$

根据两个相似三角形： $B_1O_1O_2$ 及 B_1DC 可求得 z_1 为

$$\frac{z_1}{2a} = \frac{p_1 - p}{p_1}$$

$$\text{同理} \quad \begin{cases} z_1 = 2a \frac{p_1 - p}{p_1} \\ z_2 = 2a \frac{p - p_2}{p_2} \end{cases} \quad \text{即} \quad (2-53)$$

$$\begin{cases} z'_1 = 2a\beta \frac{p_1 - p}{p_1} \\ z'_2 = 2a\beta \frac{p - p_2}{p_2} \end{cases} \quad (2-54)$$

从上式可见，景像平面上弥散斑的大小跟入瞳的大小有关，跟远景平面与近景平面（或远景平面）相对于入瞳的位置也有关。

三、在正确透视条件下景深公式如何？

弥散斑直径的允许值为多大，要由光学系统的用途来定。对于普通摄影，当照片上各点的弥散斑对人眼的张角小于人眼的最小分辨角（1—2 分），这对人眼就感觉弥散斑似个点，认为图像是清晰的。用 β 表示弥散斑对人眼的极限角。极限角确定以后，允许的弥散斑的大小还与眼睛到照片的观察距离有关故必须确定这一距离（正确透视距离）。

1. 什么叫正视透视距离？

如果以一定距离观察照片，若照片上各像点（弥散斑）对眼睛的张角与直接观察空间时各对应点对眼睛的张角相等，符合这一条件的观察距离称为正确透视距离，用 D 表示。日常经验表明，当用一只眼睛观察照片时，观察者会把像面上自己所熟悉的景物投射到空间去而产生立体感（空间感），只有以正确距离观察照片，才能得到正确的立体感（不发生景像歪曲，诸物点间相对位置正确）。下边就确定正确透视距离。

2. 透视距离 跟什么因素有关？

如图 2-74 所示，设 A 与 B 为对准平面上物体的两个端点，物高为 y ，其对入瞳中心的张角为 ω 。景像平面上跟 AB 共轭的像为 A'B'，其高为 $-y'$ 、对准平面到入瞳的距离为 $-p$ 、出瞳到景像平面的距离为 p' 。R 为观测点（眼睛的位置）。

根据正确透视距离的定义，物对 O 点的张角及像对 R 点的张角应相等（眼睛分别在两处时，可看做是瞳孔的中心）则：

$$\frac{y}{-p} = \text{tg} \omega = \frac{-y'}{-l}$$

$$l = -\frac{y'}{y} \cdot p = -\beta p$$

即正确透视距离 跟对准平面与底片平面的放大率及对准平面到入瞳间的距离有关。

3. 什么叫眼睛的极限角？

眼睛能够分辨的最小线度时瞳孔的张角，叫做眼睛的极限角，以 ϵ 表示，它约在 $1' \sim 2'$ 范围内。当人们以正确透视距离观察空间平面像时，若照片上的弥散斑对瞳孔的张角等于或小于 ϵ 时，就感觉它是一个点，认为照片是清晰的。设弥散斑直径为 z' ，观测距离为 l 则

$$\text{tg} \epsilon = \frac{z'}{l}$$

$$z' = l \epsilon = p \epsilon$$

为简单起见，各量都用绝对值（不考虑符号）。 z' 表示景像平面（底片或照片）任一弥散斑的直径（允许值），因此

$$z' = z'_1 = z'_2 = \dots = p \epsilon$$

对应于对准平面上弥散斑允许值为：

$$z'_1 = \beta z_1, z'_2 = \beta z_2$$

$$z = z_1 = z_2 = \frac{z'}{\beta} = p \epsilon$$

4. 远景和近景到入瞳的距离公式如何？

$$\begin{cases} z_1 = 2a \frac{p_1 - p}{p_1} \\ z_2 = 2a \frac{p - p_2}{p_2} \end{cases}$$

$$2ap = aap_1 - z_1 p_1$$

$$p_1 = \frac{2ap}{2a - z_1} \quad (\text{远}) \quad (2-55)$$

$$p_2 = \frac{2ap}{2a + z_2} \quad (\text{近})$$

参看图 2-73，前景（远景）与后景（近景）距入瞳的距离，跟对准平面（调焦平面）的位置、入瞳的大小及允许的弥散斑的直径有关。

5. 远景和近景深度公式如何？

图 2-73 表明：

$$\Delta_1 = p_1 - p = \frac{2ap}{2a - z_1} - p = \frac{pz_1}{2a - z_1}$$

$$\Delta_2 = p - p_2 = \frac{pz_2}{2a + z_2}$$

将 $z_1 = z_2 = P$ 代入上式则：

$$\Delta_1 = \frac{P^2 \varepsilon}{2a - p\varepsilon}$$

$$\Delta_2 = \frac{P^2 \varepsilon}{2a + p\varepsilon} \quad (2-56)$$

6. 在正确透视条件下景深公式如何？

景深等于远景深度与近景深度之和即：

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = \frac{4ap^2 \varepsilon}{4a^2 - p^2 \varepsilon^2} \quad (2-57)$$

如图 2-74 所示可知：

$$2a = 2ptgu$$

代入 (2-57) 式则：

$$\Delta = \frac{4petgu}{4tg^2u - \varepsilon^2} \quad (2-58)$$

从 (2-57) 与 (2-58) 两式可见，入瞳直径越小，即孔径角越小，或者说光圈越小，景深越大。

7. 当前景深度 $p_1 =$ ，对准平面在何处？

$p_2 =$ ，就是要使对准平面以后的整个物空间都能在景像平面（底

片上）成清晰像。由 $\Delta_1 = \frac{pz_1}{2a - p\varepsilon}$ 式可知， $\Delta_1 =$ ，分母（ $2a - p\varepsilon$ ）

应等于零，即：

$$p = \frac{2a}{\varepsilon}$$

$$\varepsilon = \frac{2a}{p}$$

这就是说当眼睛位于对准平面中心时，入瞳对眼睛的张角等于极限角。这时的近景位置 p_2 为（从图 2-73 可见）：

$$p_2 = p - \Delta_2 = p - \frac{p^2 \varepsilon}{2a + p\varepsilon} = \frac{p}{2} = \frac{a}{\varepsilon}$$

也就是将摄影镜头调焦于 $p = \frac{2a}{\varepsilon}$ 的距离时，在景像平面上可

以得到自入瞳前距离为 $\frac{a}{\varepsilon}$ 的平面起到无限远整个空间内物体的清晰像。

8. 当摄影镜头调焦至无限远时，近景位置如何？

将 $p =$ ， $z_2 = p$ 代入， $p_2 = \frac{2ap}{2a + z_2}$ 式中，并对 $p =$ 求极限，

求得近景位置为：

$$p_2 = \frac{2a}{\epsilon}$$

从该式可知，这时的景深等于自镜头前距离为 $\frac{2a}{\epsilon}$ 的平面开始至无限远。

试比较7和8中得到的近景位置公式： $p_2 = \frac{a}{\epsilon}$ 与 $p_2 = \frac{2a}{\epsilon}$ 。两种情况下景深有所不同，尽管终点同是无限远，但起点不同， P_2 值大，起点距入瞳的距离就远，故景深要小一些。

例如一个摄影镜头的入瞳直径 $2a = 10\text{mm}$ 、极限角 $\epsilon = 1' = 0.00029$ 弧度时，如果镜头对无限远调焦（对准平面调在无限远）时，近景位置为

$$p_2 = \frac{2a}{\epsilon} = \frac{10}{0.00029} = 3450\text{mm} = 3.45\text{m}$$

而按7中的条件，远景平面在无限远，对准平面 $p = \frac{2a}{\epsilon} = 3.45\text{m}$ 时，近景位置为：

$$p_2 = \frac{p}{2} = 1.725\text{m}$$

若使镜头调焦至 10 米处时，求远景和近景深度及位置、景深。

$$\Delta_2 = \frac{p_2 \epsilon}{2a + p\epsilon} = \frac{1000^2 \times 0.00029}{10 + 10000 \times 0.00029}$$

$$p_2 = p - \Delta_2 = 10 - 2.25 = 7.75\text{m}$$

$$\Delta_1 = \frac{10000^2 \times 0.00029}{10 - 10000 \times 0.00029} = 4080\text{mm} = 4.08\text{m}$$

$$p_1 = p + \Delta_1 = 10 + 4.08 = 14.08\text{m}$$

景深为

$= p_1 - p_2 = 6.33\text{m}$ ，即自物镜（入瞳）前 7.75 米，到 14.08 米止均为成清晰像的范围。

四、在不满足正确透视条件下的景深公式如何？

摄影镜头拍摄的画面是个空间物体的投影像（即空间物体的平面像），在景深范围内，所有的景物都可以反映到底片上，并在其上结成接收器所认为的清晰像。图 2-74 所示的是满足正确透视条件的，从图可知 $A'B'O'$ 与 $A'B'R$ 是相等的，即 $p = p'$ （绝对值）， p' 就是像距，一般摄影镜头的底片都放在后焦平面内，故 $p' = f'$ 。也就是说观察距离 $p = f'$ 就是正确透视条件。在此条件下的景深公式（前边导出的）为

$$\Delta_1 = p_1 - p = \frac{pz_1}{2a - z_1}$$

$$\Delta_2 = p - p_2 = \frac{pz_2}{2a - z_2}$$

从上式可见在满足正确透视条件下，景深跟焦距无关。

但是，通常人们观察底片时，都将底片放在明视距离上。如果底片上所允许的弥散斑直径是 z' ，它对眼睛的张角为

$$\varepsilon = \frac{z'}{250} = \frac{z'}{1} \quad (\text{其中 } 250\text{mm})$$

前边给出 $z = z_1 = z_2 = z' / \beta$ ——对准平面上弥散斑允许值。所以：

$$\begin{cases} z_1 = \frac{z'}{\beta} = \frac{\varepsilon l}{\beta} \\ z_2 = \frac{z'}{\beta} = \frac{\varepsilon l}{\beta} \end{cases}$$

将其代入 Δ_1 及 Δ_2 等式中则

$$\begin{cases} \Delta_1 = \frac{p\varepsilon l}{2a\beta - \varepsilon l} \\ \Delta_2 = \frac{p\varepsilon l}{2a\beta + \varepsilon l} \end{cases}$$

式中， l 是人眼观察底片的距离。因为对准平面离镜头很远，即 $P \gg f'$ ，故可认为 $X \approx P$ （这里的 P 就是光组成平面像时的物距 s ， $s = x + f'$ ，都是绝对值）；光组成像的横向放大率 $\beta = -f'/x$ 所以

$$\beta = \frac{f'}{p}$$

将 β 值代入上式则：

$$\begin{cases} \Delta_1 = \frac{p\varepsilon l}{2af' - p\varepsilon l} \\ \Delta_2 = \frac{p^2 \varepsilon l}{2af' + p\varepsilon l} \end{cases}$$

一般所说的景深都指的是这种情况，即观察条件不满足正确透视条件（ $P \gg f'$ ）时，景深的大小不仅与入瞳直径（ $2a$ ）和对准平面位置（ p ）有关，同时还与镜头的焦距有关。焦距越大，景深越小，反之亦然。另外跟观察距离 l 的大小也有关。

第七节 摄影镜头的光学特性有哪些？

一、什么叫摄影镜头？

1. 什么叫摄影系统？

通常将接收装置是一张感光底片的成像系统叫做摄影系统。如普通（民用）照相机、电影摄像机、以及生产和科研中所用的显微照相机系统、制版光学系统、航空摄影系统、水下摄影系统、空中侦察光学系统、测绘光学系统及信息处理系统等等。

2. 什么叫摄影镜头？

摄影系统的物镜俗称为镜头，它是摄影系统的主要组成部分。镜头的光学性能（光学特性）常以三大本领来描述。三大本领为：分辨本领（分辨率）、放大本领（放大率）和聚光本领（常用像面的照度来量度）。

3. 摄影镜头的三个参量是什么？

描述摄影镜头光学性能的参量为：焦距、相对孔径和视场角。

(a)为什么镜头的焦距能决定成像的大小？对同一位置的同一物体拍照，使用焦距不同的镜头可获得大小不同的像。焦距大时像亦大，焦距小时像则小。为了说明像跟焦距的关系，简略回顾一下光具组成像的知识（镜头都可认为是光具组）。

当物在有限远时，由（2-21）式、（2-23）式的关系：

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f'} = \frac{s'}{s}$$
$$y' = \left(-\frac{f}{x}\right)y = \frac{f'}{x}y \quad (f' = -f)$$

可见，在同一拍摄位置，用不同焦距的镜头，拍摄同一对象时，像的大小跟焦距 f 成正比。

当物在无限远时，物位于主光轴上的点其通过镜头的光束，可认为是跟主光轴平行的光束；其轴外不同点的入射光束，都是跟主光轴成不同角度的斜平行光束。无限远物体的像一定成在像方焦平面内。图 2-75 所示的入射光束是来自物体的边缘点的，利用焦平面的性质或节点的性质便可确定与其共轭的出射光束，出射光束的顶点即为物体边缘点的像。如图所示，像的大小跟焦距的关系为

$$y' = -f' \tan \omega'$$

可见，在底片尺寸一定时，镜头的视场角取决于焦距的大小，摄影镜头的应用条件不同，焦距的长短差别很大。最小的焦距只有几毫米如显微摄影镜头或鱼眼摄影镜头；长者可达几米，如远距离和高空摄影用的镜头的焦距；普通风景相机的镜头其焦距介于两者之间，小者十几毫米，大的可达几百毫米。变焦镜头其焦距是可变的（在一定范围内变化）。

(b)什么叫镜头的相对孔径？

镜头的入瞳孔径（直径） D 跟焦距的比，即 D/f' 叫做镜头的相对孔径，它是决定像面照度（聚光本领）和分辨本领的参量（参数）。相对孔径越大，像面照度越大，理论分辨率越高。现在的摄影镜头其相对孔径都比较大。如普通风景相机的相对孔径可达 $1:2.8$ ，有的可达 $1:1.20$ ，

这样大的相对口径，对一般摄影的分辨率要求是足够的。对于在特殊条件下的摄影如拍摄高速运动的物体，室内拍照等条件下也能满足照度的需要，但是，对于制版镜头、信息处理镜头、显微照相镜头等，就必须根据分辨率的要求来选择相对孔径。

(c) 物镜（镜头）的视场角 2ω 决定了成像的空间范围。视场角越大，能够拍摄的范围就越大。这个参数是由底片尺寸决定的，底片框就是镜头的视场光阑。如图 2-61 所示的对角线视场角，若 $y = 2y'$ 时，则：

$$y' = -f' \tan \omega' = -f' \tan \omega \quad (\text{物在无限远})$$

$$y' = \beta y = \frac{f'}{x} y \quad (\text{物在有限远})$$

可见，底片尺寸一定时，镜头的视场角（或线视 y ）取决于焦距的大小，焦距越短，视场角越大，或物方线视场（ y ）越大；反之亦然。两者同时都大（或小）那是不可能的。

摄影镜头可按视场的大小，或按焦距的长短分为一般镜头、广角镜头和长焦镜头。摄影镜头的光学特性直接影响着摄影系统的特性。其光学特性常以它的分辨率、聚光本领（像面照度）、放大本领以及景深、焦深等来表示。

二、什么叫摄影镜头的聚光本领？

摄影镜头的聚光本领是描述镜头聚集光通量能力的物理量，通常用像面照度来量度。

1. 什么叫像面照度？

决定照相底片感光程度的投射在单位像面上的总光能量的多少，也就是单位像面接受的光通量，称为像面照度。

2. 什么叫像面亮度？

人在观察像面时，瞳孔只能接收来自像面的一定立体角内的光通量，这部分光通量的多少就是像面的亮度。

3. 什么叫立体角？

在几何光学中通常是采用平面图形，角度也是平面角，而光能则是在一个立体的锥角范围内传播的，角度宜用立体角表示。

立体角如何量度？

以立体角顶点为球心，作一半径为 r 的球面。用此立体角的边界在球面上所截的面积 ds 除以半径平方标志立体角的大小，即（以 $d\omega$ 表示立体角， r 为半径），如图 2-76(a) 所示。

$$d\omega = \frac{ds}{r^2}$$

立体角的单位叫“球面度”，即以所对应的球面积大小来表示立体角的大小。顶点周围全部空间内的立体角是：

$$\frac{\text{全部球面积}}{r^2} = \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi \text{球面度}$$

立体角与孔径角有什么关系？

设 O 是物面上一点，从该点发向入瞳的光通量，如图 2-76(b) 所示，

就是在以此点为顶点，以入瞳为底面的立体角之内传播的；立体角愈大，进入入瞳的光能量愈多。经过理论推导得出的结果说明：立体角近似地正比于孔径角 u 的平方，所以增大孔径角就可以使光能按孔径角平方关系增加。

4. 什么叫光亮度？

什么叫光通量？

辐射能中能被人眼所接受的部分叫做光能，并把辐射能按视见函数折算后的可以引起人眼刺激的那部分辐射通量叫做光通量。或者说单位时间内通过摄影镜头的光能量，常以 Φ 表示。

什么叫发光强度？

如果说光通量能表征光能跟时间的关系的话；那么它跟空间关系又如何呢？定义光源发出的光能量在观察方向的强弱程度为发光强度。可以用单位立体角范围内发出的光通量（光功率）来量度。若以 I 表示发光强度，如图 2-70(b)所示，则

$$I = \frac{\Phi}{\omega} \quad (2-61)$$

什么叫光亮度？

光亮度是发光表面或用光源照明的景物反光表面，在人眼观察的方向所看到的亮暗程度，用符号 B 表示，如图 2-77 所示。 ds 为发光面上的一个微小面积元，其法线方向为 N ；求在 i 方向（任取的角度）人眼观察到的亮暗程度——光亮度。也就是在 i 方向，单位立体角内，单位面积内的光通量。或者说它就是 i 方向单位发光面上的发光强度。垂直于 i 方向的小面积元上的发光强度为：

$$dI_i = \frac{d\Phi_i}{d\omega}$$

（式中 i 方向的发光强为 dI_i 、 i 方向立体角 $d\omega$ 内光通量为 $d\Phi_i$ ；垂直于 i 方向上的面积就是微面元 ds 在垂直于 i 方向上的投影，为 $dscos i$ ，设 B_i 表示 i 方向的光亮度则：

$$B_i = \frac{dI_i}{dscos i} = \frac{d\Phi_i}{cos i ds d\omega} \quad (2-62)$$

5. 什么叫余弦辐射体？

通常情况下发光面在各个方向的亮度值是不等的。而且亮度是空间方位角的复杂函数。但是有些发光面在各个方向的光亮度都相等（但发光强度不等）。如 2-78 所示： ds 为发光面、 I_N 为 ds 法线方向的发光强度、 I_i 为与法线夹角为 i 方向的发光强度。不同方向的发光强度不同，并遵循下列规律：

$$I_i = I_N \cos i \quad (2-63)$$

如果用矢径表示发光强度（如图 2-78 所示），则各方向发光强度矢径的终点轨迹在球面上。符合式（2-63）规律的发光体称为“余弦辐射体”或“朗伯辐射体”。将式（2-63）代到（2-62）式中则

$$B_i = \frac{dI_i}{dscos i} = \frac{I_N \cos i}{dscos i} = \frac{I_N}{ds} \text{ (常数)} \quad (2-64)$$

因为一个面发光体其发光面积 ds 是一定的，其法线方向的发光强度

I_N 也是不变的, 所以式 (2-64) 中的光亮度 B_i 是个常数。

“余弦辐射体”的发光表面可以是本身发光的表面, 也可以是本身不发光, 而由外来光照明后漫透射或漫反射的表面。如图 2-79 所示为乳白玻璃的漫透情况。

例如摄影中用的漫射镜就是用没有颜色的透明的光学玻璃制成的。其中一种是无色玻璃的镜面上有不规则的平面, 这些不规则的平面实际都是如图 2-79 所示漫射面, 光线漫射起到柔焦效果。如散光式放大机和半聚光式放大机中的磨砂玻璃都是漫射体。

绝对黑体就是理想的余弦辐射体。有些光源很接近于余弦辐射体, 像平面状钨灯的发光 (放大机中的光源等), 其发光强度曲线很接近双向的余弦发光体。

6. 什么叫定向辐射?

定向发光表面, 也可以是本身不发光, 而由外来光照射后定向透射 (折射) 或定向反射的表面。在定向反射或定向折射中, 反射光或折射光方向的亮度最大, 其余方向亮度为零, 不具有余弦辐射的性质。例如通常的摄影镜头, 光都是定向传播的。

7. 光在摄影镜头中传播, 能量如何变化? 摄影镜头可以看做是光能的传递系统, 我们所关心的通常是传递的终端 (像面) 或中间某一截面 (过渡的中间像面) 处的光能状况。一般情况下由始端到终端传递过程中光能要减小的。

如果传递过程中光能有损失, 则把出射光能与入射光能的比值称为镜头的透过率, 用符号 K 表示, K 值永远小于 1。如果入射能为 1 时, 那么总体 1 减去透过率就是损失的部分, 即损失率为:

$$\text{损失率} = (1 - K)$$

例如, 某镜头的透过率 $K = 80\%$, 则损失率 = $100\% - 80\% = 20\%$ 。若 $K = 1$ 时, 则损失率为零即无损失。光通量是单位时间内进入摄影镜头中的能量。如果传递过程中不存在拦光、吸收、反射等损失, 由于能量守恒, 出射光通量 一定等于入射光通量 即:

=

如果有损失出射光通量为:

$$= K$$

8. 摄影镜头中造成光能损失的原因是什么?

摄影镜头中造成光能损失的原因主要有如下三方面。

(1) 什么叫透射面的反射损失?

摄影镜头通常都是复杂的透镜组, 现在我们就来分析其中一个透镜的情况, 如图 2-80 所示, 一条入射光线经过第一个折射面时就反射掉一部分光能如图中的 1 经过第二个折射面时又反射掉一部分能量如图中的 2, 图中的 3 再经过反射和折射最终变为杂光 s 。常用折射时的反射率来量度反射损失的大小,

$$\rho = \left(\frac{n' - n}{n' + n} \right)^2 \quad (2-65)$$

式中, n 、 n' 是界面前后介质的折射率, 是该面的反射光通量与入射光通量之比。该面的透光率以 表示则:

$$= (1 - \rho) \quad (2-65)$$

(2-65) 式是近似计算公式，仅适用于入射角与折射角小于 45° 的场合。例如光从空气射到玻璃时， ρ 一般在 $4\% \sim 6.7\%$ 左右，对于胶合面（两边都是玻璃） ρ 小于 0.001 ，反射损失可忽略不计。

为了减少反射损失，常在与空气接触的透射表面镀增透膜层。镀增透膜后，每面反射率 ρ 可降到 $0.02 \sim 0.01$ 以下，而 τ 可增到 $0.98 \sim 0.99$ 。镀增透膜不仅能减小反射损失，同时也可提高像的清晰度，如图 2-80 中的光线 5 是不按正常光路进行的杂光，经过各表面及内壁多次反射后，叠加到最终的像面上（并不参与成像），使图像的对比度降低，严重影响像质。

(2) 什么叫镀金属层的反射面的吸收损失？

镀金属反射面，是为了增强反射能力，但是并不能使入射光通量全部反射，因为镀膜要吸收掉一部分能量。例如相机的亮框取景器中及测距器等都用反光镜改变光路，折反系统的反光元件等都需增强反光能力。

(3) 什么叫光学材料内部的吸收损失？

光学材料不可能完全透明，当光束通过光学材料时，一部分光能就被它吸收掉了；一般光学材料内部多少都有点杂质、气泡等使光散射也要损失光能。光学材料的吸收损失，跟光学元件的厚度有关。用穿过一厘米厚光学材料吸收的通量跟入射光通量之比来量度其吸收程度。用 α 表示则：

$$\alpha = \frac{\Phi_{\text{吸收}}}{\Phi_{\text{入射}}}$$

α 称为吸收率。则 $(1 - \alpha)$ 称为透明率即：

$$(1 - \alpha) = \frac{\Phi_{\text{出射}}}{\Phi_{\text{入射}}}$$

9. 光学玻璃按吸收不同可分几种？

什么叫选择吸收？

光学材料对各种光波吸收不相等称为选择吸收。例如某透明材料对红、绿光吸收率高（透明率低），而对蓝光透明率高（吸收率低），则入射白光通过后，只剩蓝光，这种材料为吸收性滤色玻璃。各种颜色滤光镜就是根据光学材料选择吸收性质制成的。

什么叫无色玻璃？

对可见波段各种波长的透明率都相等且接近于 1 的玻璃叫做无色透明玻璃。显然摄影镜头的镜片适合用这种光学玻璃作原料。

什么叫中性滤光片？

对可见光各波段各种波长的透明率相等，其值为 $0 < (1 - \alpha) < 1$ 称为灰滤光片或中性滤光片。例如偏振镜等许多附加镜（不对任何波长有选择性）等都是中性滤光片。

10. 如何求像面上的照度？

像面的照度就是单位像面接受的光通量。如图 2-81 所示， ds 为像面的面积，如果能求出 ds 所接受的总光通量和 ds 的大小，就可求得它的照度。

以小视场大孔径的条件为例进行讨论。ds 为离入瞳较近的微小物面（可看作是小发光面），垂直于摄影镜头的主光轴，亮度为 B，最大孔径角为 u，入瞳面积较大。像面所接受的光通量，首先必须通过入瞳。因此，我们首先讨论物方量。

通过入瞳的光通量如何求？

由式 (2-62)

$$B_i = \frac{d\Phi_i}{\cos i ds dw}$$

可求出 di 小立体角边缘所截的小面元的光通量为

$$d\Phi_i = B_i \cos i ds dw$$

由数学知识求得 d 为

$$d = \sin i di d\varphi$$

代入上式则 $d\Phi_i = B_i \cos i ds \sin i di d\varphi$

图中带阴影的小面积元是任取的，首先可以将整个入瞳分割为许多小扇形，然后再把每一小扇形分割成许多小矩形，每一小矩形的长与宽可由边角关系求出，再求出小面积，就可以求出其光通量（如上式）；第二步就是求出通过所有小面元的光通量之和；第三步就是求这极限（二重积分）。总之通过对整个入瞳进行无限分割，取通过各部分光通量之和再对和求极限，这个极限就是通过整个入瞳的光通量为（设 ds 为余弦辐射面）：

$$\Phi = \pi B ds \sin^2 u \quad (2-66)$$

通过出瞳的光通量等于什么？

用同样的方法，求得从出射光瞳到微小像面上的光通量为：

$$\Phi' = \pi B' ds' \sin^2 u'$$

其中 B' 为像方光亮度，u' 为像方孔径角。如果从物面到像面传递过程中光能有损失，其透过率为 K 时，则：

$$\Phi' = K\Phi = \pi B ds \sin^2 u K \quad (2-67)$$

像面中心部分的照度 E 为：

$$\begin{aligned} E' &= \frac{\Phi'}{ds'} = K\pi B \sin^2 u \frac{ds}{ds'} \\ &= K\pi B \sin u^2 \frac{y^2}{y'^2} = \frac{K\pi B \sin^2 u}{\beta^2} \quad (2-68(a)) \end{aligned}$$

其中 y、y' 为物高和像高，β 为垂轴放大率。

什么叫摄影镜头（显微系统）的数值孔径？像差理论中的正弦条件（小视场，大孔径光组成完善像的条件）为：

$$n y \sin u = n' y' \sin u'$$

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{n \sin u}{n' \sin u'}$$

因此

$$E' = \frac{K\pi B \sin^2 u}{\beta^2} = K\pi B \sin^2 u' \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \quad (2-68(b))$$

其中 n sin u 或 n' sin u' 即折射率与孔径角正弦之积叫做数值孔

径。若物方的光亮度 B 一定时， β 为常数，透过率 K ，折射率都一定，则像面中心部分的照度正比于像方数值孔径的平方。

11. 小视场，大孔径的摄影镜头光亮度的传递规律是什么？

经过推导得到规律如下：

$$\frac{B'}{n'^2} = \frac{B}{n^2} \cdot K$$

由上式可知，当光能没有损失时即 $K=1$ ， B/n^2 为传递不变量，如果物与像方介质相同，则物面像面的光亮度相同；若 $n=n'$ ， $K<1$ 时，像面光亮度小于物面光亮度。这个规律也适合于大视场大孔径条件下的像面中心部分。

12. 物很远时，摄影镜头的聚光本领如何？

前边讨论的情况适合于物很近的条件，像显微系统。但当物很远时，图 2-82 中的 u 很小，在不同情况下 $\sin u$ 差别不大，同时 β 也较难计算。这时，用下列方法较为方便。如图 2-82 所示。 u 为出瞳 $A B C D$ 对像面元所张的最大孔径角、 D 为出瞳的直径、像方焦点到出瞳的距离为 $-x'_p$ 、 F' 到像面的距离为 x' ，从图可见

$$\sin u' = \frac{D'/2}{x' + (-x'_p)}$$

代入 (2-68b) 式中则

$$E' = K\pi B \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \sin^2 u' = K\pi B \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \frac{D'^2}{4(x' - x'_p)^2} \quad (2-68(b))$$

为便于计算，将上式变为

$$x' - x'_p = f' \left(\frac{x'}{f'} - \frac{x'_p}{f'} \right) = f'(\beta_p - \beta)$$

由 (2-21) 式可知 $\beta = -x'/f'$ 是物、像两面间的横向放大率， β_p 为入瞳面与出瞳面间的横向放大率，即 $\beta_p = D'/D$ ， $D' = \beta_p D$ 因此

$$E' = \frac{1}{4} K\pi B \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \left(\frac{\beta_p}{\beta_p - \beta}\right)^2 \quad (2-69)$$

从上式可见，在其它条件相同时，物镜的聚光本领即像面的照度正比于 $(D/f')^2$ 。 D/f' 就是前面所说的摄影镜头三个参量之一的相对孔径，由 (2-69) 式可见，它决定着摄影镜头的聚光本领。以后还会看到，它也决定着摄影镜头的分辨本领。式 (2-68(a)) 与 (2-68(b)) 适用于显微系统；式 (2-69) 则完全适用于望远系统。对于足够远的物体，物镜所成的像远远小于物，即横向放大率远小于 1，即 $\beta \approx 0$ ，因此 (2-69) 式为

$$E' = \frac{\pi K B}{4} \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \quad (2-69(b))$$

13. 照相机的聚光本领等于什么？

照相机的聚光本领因拍摄条件不同，如拍摄远、近、一般

距离的物体时的聚光本领，即像面照度是不同的。为简单起见，设摄影镜头是对称型结构，光圈置于光组中间，因此入瞳面跟出瞳面间的

横向放大率 $\beta_p = 1$ (即 $D' / D = 1$) ; 镜头置于空气中则 $n' = n = 1$, 这些条件是符合普通摄影镜头的实际情况的。因此 (2 - 69) 式变为

$$E' = \frac{1}{4} K\pi B \left(\frac{n'}{n} \right)^2 \left(\frac{D}{f'} \right)^2 \left(\frac{\beta_p}{\beta_p - \beta} \right)^2$$

$$= \frac{1}{4} K\pi B \left(\frac{D}{f'} \right)^2 \left(\frac{1}{1 - \beta} \right)^2 \quad (2 - 70)$$

拍摄远物时的聚光本领如何？

拍摄远物时， $\beta = 0$ ，则 (2-70) 式变为：

$$E' = \frac{1}{4} K\pi B \left(\frac{D}{f'} \right)^2 \quad (2 - 71)$$

拍摄近物时的聚光本领如何？

拍摄近物时，设像物一样大时，即 $\beta = -1$ (负号表示像是倒立的实像)，于是 (2-70) 式变为：

$$E' = \frac{1}{16} K\pi B \left(\frac{D}{f'} \right)^2 \quad (2 - 72)$$

可见在 B 与 D / f' 相同时，近照比远照时的聚光本领要小。照相底片的曝光时间是由感光膜的灵敏度和像面的照度共同决定的。感光膜相同时，照度越强，曝光时间越短。

14. 大视场摄影镜头轴外像点照度如何降低？

在图 2 - 81 中所示是小视场大孔径轴上物点或像，视场中心像面元上的照度规律；图 2-81 所示是表示大视场小孔径时像场中心像面元上的照度规律，后者是以前者为基础的，只是具体化而已。因此式 (2-68(a)) 与 (2-68(b)) 是像面照度的基本公式，对于小视场大孔径、大视场小孔径还是大视场大孔径像面中心部都适用。下面我们简略分析一下大视场轴外像点的照度情况。

图 2-83 给出了出瞳、像面、主光轴的位置；给出了充满出瞳的轴上与轴外像点 A 与 M 为顶点的光束。 w 为视场角， u' 为轴上点最大孔径角， u'_m 为轴外点最大孔径角。按基本照度公式， M 与 A 点的照度分别为 E'_m 与 E'_A 为：

$$E'_A \propto \sin^2 u' , E'_m \propto \sin^2 u'_m$$

引入辅助线 CD ，如图所示，轴上点和轴外点的孔径角是不相等的。由图中的几何关系可知：

$$\sin u'_m = \sin u' \cos^2 w$$

$$\sin^2 u'_m = \sin^2 u' \cos^4 w$$

因此视场边缘像点照度为，

$$E'_M = E'_A \cos^4 w$$

$$\begin{aligned} \text{注: } \operatorname{tg} u'_1 = \sin u'_m &= \frac{O'C}{O'M'} = \frac{O'B' \cos w}{\frac{O'A'}{\cos w}} \\ &= \frac{O'B'}{O'A'} \cos^2 w = \sin u' \cos^2 w \end{aligned}$$

角度较小时，其正切值等于正弦值。

$$E'_E = E'_A \cos^4 w \quad (2-73)$$

显然视场边缘像点的照度以 $\cos^4 w$ 的因子降低，以 $\frac{E'_m}{E'_A}$ 表示视场边缘

光照度与中心照度的比值。从表 2-4 中可看出，在视场较大时，光照度下降得是比较严重的。

表 2-4 轴像点的照度

| 视场角 () | 0 ° | 10 ° | 20 ° | 30 ° | 40 ° | 50 ° | 60 ° |
|--------------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|
| $\frac{E'_m}{E'_A} = \cos^4 w$ | 1 | 0.94 | 0.92 | 0.56 | 0.34 | 0.17 | 0.06 |

在某些广角航摄镜头中， 2ω 可达 120° 以上，为了提高边缘像点的照度，常故意使轴外点光束产生一定的像差，即增大轴外点孔径角 u'_m ，而使降低因子变为 $\cos^3 w$ ，这种方法叫做用像差渐晕法改善像面边缘照度。

15. 什么叫镜头光圈系数？

(2-71) 式普通摄影时像面中心部分的照度分式。

$$E' = \frac{1}{4} K \pi B \left(\frac{D}{f'} \right)^2$$

式中 K 是常数，对于特定的镜头其透过率 K 也是一定的；对于一个物定的被摄对象其光亮度 B 也是一定的。在这种情况下，像面接受的光能量 E' 为

$$E' \propto \left(\frac{D}{f'} \right)^2$$

定义相对孔径 D/f' 的倒数，即 f'/D 为光圈系数也叫镜头的“F数”则

$$F \text{ 数} = \frac{f'}{D}$$

F (或 f') 数越大，说明相对孔径越小，像面照度越小。因为 E' 跟 F 数的平方成反比，即：

$$E' \propto \frac{1}{F^2}$$

$$F \propto \frac{1}{\sqrt{E'}}$$

为了使照像镜头适应各种自然条件和人工照明条件，通常都把镜头的有效光阑做成是可以改变孔径 D (就是入瞳直径 $2a$) 的大小，因此可以自由地选择时间光圈的匹配。根据像面照度与相对孔径平方成正比的

关系，来确定光圈的变化规律，即以 $1/\sqrt{2}$ 为公比的等比级数关系间断地排列光圈直径，使相邻两档光圈的曝光量在相同时间内仅差一倍，每增大一档光圈，像面照度就增大一倍。表 2-5 所示，是国家标定的光圈排列。

表 2 - 5

| | | | | | | | | | | | |
|------|---|-----|---|-----|---|-----|---|----|----|----|----|
| D/f' | 1 | 1.4 | 2 | 2.8 | 4 | 5.6 | 8 | 11 | 16 | 22 | 32 |
| F 数 | 1 | 1.4 | 2 | 2.8 | 4 | 5.6 | 8 | 11 | 16 | 22 | 32 |

从表中可见：

光圈系数愈大，相对孔径愈小即光圈愈小，在其它条件相同时，像面照度愈小；

每增大一档光圈，像面照度就增大一倍。例如当光圈系数由 1.4 即 $\sqrt{2}$ 变为 1，光圈就增大一档，相对口径就由 $1/\sqrt{2}$ 增到 1，像面照度就由

$$E_{1.4} = \frac{1}{4} K\pi B \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right)^2$$

增到

$$E_1 = \frac{1}{4} K\pi B \left(\frac{1}{1} \right)^2$$

增加的倍数为

$$E_1 - E_{1.4} = \frac{1}{4} K\pi B \cdot \frac{1}{2}$$

即 E_1 比 $E_{1.4}$ 增大一倍。换句话说，F 数每增大一档（光圈减小一档），像面照度就减半（后者为前者的一半）。如 $E_{1.4} = \frac{1}{2} E_1$

16. 什么叫光圈 T 数？

光圈的 F 数表示同一镜头在不同使用条件下的照度特性。但对于不同的摄影镜头，因光学结构不同，镜片数目不同，镜片厚度不同，镀膜情况不同，所用光学材料不同等等，因此对光能的反射和吸收情况各不相同，这就决定了它们的透光能力不同，所以用不同镜头，就是用相同的光圈系数、在同一时间、对同一物体拍照时，底片上的照度特性也是不一样的。为了能体现镜头的透过率 K 对摄影镜头成像照度的影响，引入光圈 T 数的概念定义式如下

$$T = \frac{F}{\sqrt{K}}$$

T 为光圈 T 数，F 为光圈的 F 数，K 是镜头系统的透过率。T 与 F 本质是相同的，只是 T 比 F 更科学化了。在某些新型电影摄影镜头上，除了标示有 F/值光圈系数外，同时也标示有 T/值光圈系数（又称 T 数）。将光圈 F 数和 T 数代入普通摄影镜头照度公式（2-71 式）中则

$$E' = \frac{1}{4} \pi K B \left(\frac{D}{f'} \right)^2 = \frac{\pi}{4} K B \frac{1}{F^2} \quad (2-74(a))$$

其中 $\frac{K}{F^2} = \frac{1}{T^2}$ 则

$$E' = \frac{\pi}{4} B \frac{1}{T^2} \quad (2-74(b))$$

以上两式就是用光圈 F 数与 T 数表式的照度公式。(2-74(a)) 与 (2-74(b)) 是由 (2-71) 式推导而来, 因为普通摄影大都满足 (2-71) 式的条件 (物距远远大于像距 0), 而 (2-71) 式又是由 (2-68) 推导而来, 故 (2-68) 式是摄影镜头的像面照度的基本公式。

17. 什么叫镜头的特性系数?

将各种影摄影镜头像面照度的因素用一个物理量来表示, 这个物理量就叫做摄影镜头的特性系数, 以 q 表示, 经过推导得到的代数式为

$$q = \frac{\pi}{4} \left(\frac{s-f'}{s} \right)^2 K \eta H \cos^4 w \quad (2-75)$$

其中, π 是圆周率, 取 3.1416;

s 是物距 (被摄景物到物方主点的距离); f' 是摄影镜头的焦距;

K 是整个摄影镜头的透过率;

η 为镜头的杂光系数;

H 为镜头的渐晕系数;

w 为物方半视场角。每项的作用简述如下

$$\left(\frac{s-f'}{s} \right)^2 = (1 - \frac{f'}{s})^2, \text{ 在普通摄影时, } f' \ll s', s'/s = \frac{1}{M}, \text{ 被摄}$$

物体愈近 (s 值愈小), M 愈大, $(1 - \frac{f'}{s})^2$ 愈小, 像面照度也愈小, 从式 (2-71) 与 (2-72) 就已经知道近摄比远摄时的照度小。

镜头透过率 K 对像面照度的影响。像面照度等于单位像面上的光通量, 这个光通量等于通过入瞳的单位面积的光通量与 K 的乘积。所以 K 越大, 像面照度越大。 K 的大小主要由两方面原因决定, 一是镜头对光的吸收作用, 二是各镜片跟空气接触面对光的反射, 被反射这部分光成为杂散光不能参与成像。为了减小反射, 通常采用镀增透膜的方法。在镀增透膜技术问世之前, 镜头的透过率都在 0.7 以下, 而镀增透膜之后的镜头, 其透过率 K 可达 0.9 左右。 K 跟增透膜情况的关系如表 2-6 所示。

表 2-6 透过率跟增透膜的关系

| 透镜与空气接触面数 | 未镀膜透过率 | 单层透过率 | 多层膜透过率 |
|-----------|--------|-------|--------|
| 2 | 0.90 | 0.96 | 0.99 |
| 4 | 0.81 | 0.92 | 0.98 |
| 6 | 0.73 | 0.88 | 0.97 |
| 8 | 0.66 | 0.85 | 0.96 |
| 10 | 0.60 | 0.82 | 0.95 |

表中所示数据说明 K 决定于光组的结构, 镜片的组数, 以及制造镜头的工艺水平等。

像面照度与镜头杂散光系数成正比。由于镜头中的镜片表面对光线的多次反射，或镜筒内壁的反射，或镜头内部气泡、条纹、杂质的散射、或由透镜表面抛光质量不好，有划痕和密集的麻点等缺欠而产生的散射，或由于透镜表面不清洁，像指纹或附着的尘土、霉点等的散射等等使一部分成像光线中途被转变为杂散光，以不同途径到达像面，它们不但能射到像面的明亮部分，而且也能射到较暗的部分，这样就会使像面的明暗层次不分明，对比度下降。比如说，在底片的中心部分照度很大，设为 100 个单位成像光线，每增加一个单位的光，其照度只不过增加百分之一；在阴影部分一个单位的成像光线中，若增加一个单位的杂散光，就会使照度增加 100%。所以杂散光对阴影部分的影响远远大于对强光部分的影响。杂散光实际上是压缩了影调的范围。用杂散光严重的镜头拍摄的感光片，看上去景物好像笼罩着一层雾气，很不清晰。现在镜头，杂散光造成的影响约为 3% 左右，相当于杂光系数 $\sigma = 1.03$ 。

像面照度与渐晕系数 H 成正比。渐晕系数等于视场为 w 的斜光束宽度 $D_w = CD$ 与轴向宽光束宽度 D （入瞳孔径如图 2-83 所示）之比即：

$$H = \frac{D_w}{D}$$

一般镜头视场角 w 在 12° 以内，像面上无渐晕现象。

像面照度与分布系数 $\cos^4 w$ 成正比。一般当物面的亮度均匀分布（为余弦辐射）时，感光胶片（像平面）内的照度并不均匀，它的照度从中心到边缘以 $\cos^4 w$ 因子迅速降低。若以 E_w 表示视场中心的照度，以 E_0 表示半视场 w 对应的边缘视场照度如图 2-83 所示，则

$$E_w = E_0 \cos^4 w$$

可见，镜头的特性系数 q 的表示式跟其它照度公式比，能更全面的描述镜头成像，像面的照度分布情况。

底片上的感光层的光化作用强度跟感光层吸收的光能大小成正比，即正比于曝光时间和底片的照度。摄影就是利用景物发出的光线，通过镜头会聚投影在感光底片上使之曝光，即可获得景物潜影像。底片影像的质量主要决定于照相机镜头的质量、感光胶片的质量和正确曝光。对摄影者来说，如何用现有的相机和感光胶片，获得最佳的底片影像呢？办法只有一个，那就是靠正确曝光。所以了解和掌握镜头的聚光本领方面的知识是很必要的。

18. 什么叫曝光参数方程？

曝光参数方程的推导依据是，景物在底片上的曝光量 H_f 等于胶片的最佳曝光量 H_g 。即

$$H_f = H_g \quad (2-76)$$

依 (2-76) 式为主导思想推得的曝光方程为

$$\frac{A^2}{T} = \frac{B s_x}{K}$$

式中： A ——镜头的光圈数

T ——快门的有效曝光时间

B ——景物的平均亮度

s_x ——胶片的感光度 (ASA)

K——照相机（或测光表）的曝光常数

由（2-77）式可知：镜头光圈数、快门有效曝光时间、景物亮度、胶片感光度及相机曝光常数各量之间是互相制约，例如，当景物亮度与胶片感光度确定之后，光圈数（或曝光时间），是不能任选的，应由方程式（2-77）求出，才能实现正确的曝光。

三、什么叫摄影镜头的分辨本领？

1. 何谓摄影镜头的分辨本领？

摄影镜头对两个非常靠近的物点刚好能加以识别的能力。就是摄影镜头的分辨本领。通常将能分辨的两个物点之间的最小角距离或最小线距离的倒数叫做分辨率，或鉴别率，分辨本领，日文称作解像能力。一般指在精确调焦后的像平面上，一毫米范围内能分辨开的黑白相间的线条对数，其单位为“线对数/毫米”，也就是被摄影镜头分辨开的最小距离的倒数。线对数越多，分辨本领越大，成像越清晰。

因此，常用摄影镜头的分辨率来评价镜头的像质。当然它不是唯一的方法，也不是最佳的方法，只是一种常用的方法而已。

摄影镜头的拍摄条件不同，其分辨本领的表示方法是有所不同的。例如远摄时跟望远镜的分辨本领相同；“近摄”和“显微镜摄影”则与显微镜分辨本领相同；通常照相镜头跟眼睛的分辨本领完全一样。

2. 什么是望远镜的分辨本领？

什么叫爱里斑？

在几何光学中，将摄影镜头作为理想光具组时，物空间与像空间是点对应的，也就是说物点的“像”也是一点。但是，由于光的波动性，当光受到摄影镜头的光瞳限制后，光既沿原来的传播方向作直线传播，也会偏离原传播方向传播，并且强度（照度）的分布变得不均匀，这就是光的衍射。如图 2-84(a)所示，是轴上无限远物点通过摄影镜头在像方焦平面附近像面的像，是个衍射图样，中间的亮斑叫做爱里斑；爱里斑的光强（照度）最大，第二个亮环叫次最大，比爱里斑光强小许多，这可用示意图 2-84(b)与(c)稍加说明，图中所示 D 为摄影镜头光圈（或光瞳）直径，像平面上的衍射图形只画了中央的爱里斑与第一个暗环（光强度为零），图(c)则表示爱里斑，次最大（第二亮环），第三个亮环的光强度分布。什么叫瑞利判据？

两个物点所成像能够分辨的极限（最小角距离或最小线距离）或叫最小条件——瑞利判据。瑞利判据指一个物点成像的衍射主极大斑（爱里斑）刚好落在另一物点所成像的第一极小位置，即一个爱里斑中心与另一个爱里斑的边缘重合时，理论计算表明，两个爱里斑重叠区域的光强为每个爱里斑中心最亮处光强的 80%，对正常人眼是刚能分辨这种光强差别。如图 2-84(d)、(e)所示。如果两个爱里斑间的距离小于这个极限距离 Q ，则两像点眼睛看到的就是一个像点。

望远镜分辨极限的表示式如何？

图 2-85 所示， y' 为物镜成的中间像，因为物在无限远，此像即成在物镜的像方焦平面处，物镜本身就是光瞳，因此（ Q 很小， $Q \approx y' / f'$ ）：

$$y' = f' \theta_Q$$

衍射理论计算得到爱里斑角半径 θ_Q 为

$$\theta_Q = 1.22 \lambda / D$$

θ_Q 为爱里斑角半径 (瑞利判据)、 λ 为波长, D 为光瞳直径, 所以

$$y' = f' \frac{1.22\lambda}{D} = 1.22 \frac{\lambda}{\frac{D}{f'}} \quad (2-78(a))$$

其中 D/f' 为望远物镜的相对孔径, 可见其分辨极限跟它的相对孔径成反比, 跟波长成正比。对于陆地望远镜和照相远摄时都适用。

3. 显微镜的分辨极限表示式如何?

图 2-86 所示为显微物镜成像光路图。计算显微镜的分辨本领是很复杂的, 为简单我们只作简单的估算。假定被摄物体为每一发光点经过光瞳在像面上的衍射花样的爱里斑与平行光束的爱里斑的角半径 θ_Q 都相同。跟望远物镜相同之处都是先计算中间像 y 的最小条件 (瑞利判据的具体形式), 不同的是物距和像距的相对大小不同, 此种情况是物距很小, 像距很大, 即 $s \gg f$, 所以式 (2-78(a)) 变为 (2-78(b)) 式

$$y' = s' \frac{1.22\lambda}{D} \quad (2-78(b))$$

由图 2-89 可知

$$\sin u' \approx \tan u' = \frac{d/2}{s'}$$

根据物空间与像空间的过渡式

$$n y \sin u = n' y' \sin u'$$

则

$$y \sin u = y' n' \frac{D}{2s}$$

将 (2-78(b)) 式代入上式, 即 (设 $n = 1$) :

$$y = 0.610 \frac{\lambda}{n \sin u} \quad (2-79)$$

其中 $n \sin u$ 是物镜的数值孔径。显微物镜的分辨极限通常以被观察物面上刚刚能够分辨开的两物点间的直线距离 y 表示。 y 正比于光的波长反比于入瞳 (物镜) 的数值孔径。因此欲提高显微物镜的分辨本领 (减小分辨极限), 有如下两种途径:

(a) 增大数值孔径, 如在物和物镜之间充满油来增大 n ; 用平凸和弯月形镜组减小光线的发散来增大孔径角;

(b) 减小波长, 如电子显微镜, 电子的波长比可见光的波长小。紫外显微镜多用 2000 到 2500 埃的紫外光, 它较可见光的分辨本领高一倍左右。

4. 人眼的分辨极限如何?

对于人眼的分辨极限也必须满足瑞利判据:

$$\theta_Q = 1.22 \lambda / D$$

人眼的瞳孔直径 D 为 2mm ~ 9mm, 取中间值 D 为 5mm, 可见光中心波长也

就是人眼最敏感的波长为 5500 埃，因此人眼的分辨极限角为一分。当物体对人眼的视角小于 1' 时，人对物体的细节就不能分辨，看起来就是一点，这时物体在视网膜上的像刚好是一个感光细胞的大小，人眼的明视距离为 25cm，视网膜至瞳孔的距离为 22mm 时，因此人眼可分辨明视距处的最小线距离为

$$y = 25 \text{ Q } 0.1\text{mm}$$

视网膜上可分辨像的最小距离为

$$y = 22 \text{ Q } 5 \times 10^{-3}\text{mm}$$

5. 摄影镜头的分辨本领如何表示？

近摄时是为了分辨物体的细节。因此其分辨极限是用两物点间的距离 y 来表示，它的表示式前边已求得。其分辨本领为

$$N = \frac{1}{\Delta y} \quad (2-80(a))$$

远摄时是为了分辨像的细节，因此它的分辨极限用两像点间的距离表示，其分辨本领为

$$N = \frac{1}{\Delta y'} \quad (2-80(b))$$

6. 摄影镜头的实际分辨本领跟哪些因素有关？

镜头的实际分辨本领与理论分辨本领不同，以前讨论的只是镜头的理论分辨率，其前提是镜头的像差已得到了很好的校正，根据衍射理论和瑞利判据定义的，其值仅与镜头的相对孔径有关，由式 (2-80(b)) 与式 (2-78)，当波长 $\lambda = 5500\text{\AA}$ ，单位长度 (1毫米) 里的线对数 N_L 为

$$N_L = 1475 \frac{D}{f'} \quad \text{线 / 毫米}$$

可见相对孔径越大，镜头的理论分辨率越高。

什么是摄影系统的分辨率？

摄影系统的分辨率是一个整体的概念，这个系统包括摄影镜头和照相底片，它们共同作用的结果才能表示这个系统的特性。设摄影镜头的分辨率为 N_L ，底片的分辨率为 N_p ，系统的分辨率为 N ，三者间的关系可用下列经验公式表示

$$\frac{1}{N} = \frac{1}{N_L} + \frac{1}{N_p} \quad (2-81)$$

摄影镜头的理论分辨率与实际分辨率为什么不同？

因为摄影镜头的分辨率，其值不仅仅取决于物镜的衍射状态，同时也取决于像差的大小。摄影镜头是大视场、大孔径的光学系统，偏离理想光组的条件甚远，尽管对其像差进行了校正，但仍残存着剩余像差。像差对像点的能量分布影响很大，其程度远远超过了衍射作用产生的影响。当像差把像点的能量分散时，物镜的实际分辨随之降低，这就是物镜的实际分辨率低于理论分辨率的主要原因。由于摄影镜头的像差随视场的变化较为明显，所以各视场实际分辨率的差别很大。例如广角镜头的分辨率中心最高，边缘最低，其差别能达一、二倍。

7. 怎样测定摄影镜头的分辨率？

什么叫目视测定法？

在被测摄影镜头焦平面上装上带有分辨率板的平行光管，产生平行光束，通过摄影镜头成像（分辨率板图形的像），用眼直接观察分辨率板的像或用显微镜观察分辨率板的像。把能分辨的最高一组分辨率条纹所对应的分辨率值（条纹数/毫米），定为摄影镜头的目视分辨率。

什么叫照相法？

用待测的摄影镜头对标准分辨率板（图 2-87 进行拍照，然后观察所得的负片（用显微镜观察），能够分辨的条纹间隔最小的那一组图案，它旁边标注的数字，就是被测镜头在这特定条件（物距或视场、底片性能，显微镜的放大本领等）下的分辨率。

镜头的分辨率与对比度有密切的关系，如果用各种对比度的分辨率板来测定镜头的分辨率，就会得到不同的结果。这一事实说明像差与分辨率的关系不是唯一的，也就是说用分辨率法评价镜头的像质是不全面的。比较科学的方法是用传递函数来评定镜头的质量。不过因为分辨率简单、方便宜行而被广为采用。

四、什么叫放大本领？

1. 什么叫放大本领？

如图 2-88 所示， u 为眼睛直接观察物体 y 时的像方孔径角，在视网膜上像高为 y' ，眼球的直径为 d 。 y'' 为通过光具组观察物体 y 在视网膜上的像高， u' 为像方孔径角。如图所示可知

$$\operatorname{tgu} = \frac{y}{d}$$

$$y = d \operatorname{tgu}$$

$$y'' = d \operatorname{tgu}'$$

定义放大本领（或视角放大率、视放大率）为

$$M = \frac{y''}{y'} = \frac{\operatorname{tgu}''}{\operatorname{tgu}'} \quad (2-82)$$

如果把眼睛作为折射率为 n 的单折射球面，根据折射定律，视网膜上的像对节点（瞳孔）张角与物对节点张角，当角度较小时，它们成正比

$$w = nu$$

$$w' = nu'$$

因此系统的放大本领也可表示为

$$M = \frac{\operatorname{tg}w'}{\operatorname{tg}w} \quad (2-83(a))$$

$$\text{当角度较小时 } M = \frac{u''}{u'} \text{ 或 } M = \frac{w'}{w} \quad (2-83(b))$$

2. 视放大率跟角放大率、横向放大率有什么区别？

视放大率跟角放大率的区别在于：由 $M = w' / w$ ，可知，视放大率是通过光具组成的像与物“对眼睛”的张角之比；角放大率则是出射孔径角跟入射孔径角之比，也就是出射线与其共轭的入射线跟“主光轴”的

夹角之比。视放大率跟横向放大率的区别在于：横向放大率的定义式 $M = y' / y$ 是像高与物高之比；视放大率定义式 (2-82) $M = y' / y$ ， y' 是物体 y 经光组成的像在视网膜上的像； y 是物体直接在视网膜上成的像。

3. 用助视仪器为什么能看清楚物体？

什么叫视角？

物或像对眼睛瞳孔的张角叫视角。视角的大小跟物体的远近，及物体的大小有关，同一物体越近视角越大；同一距离的物体，物体越大视角越大，但是物体到眼睛的距离不能小于眼睛的近点，否则反而更看不清。

视角跟视场角有什么区别？

视场角是摄影镜头成像时，决定视场大小的一对共轭线跟“主光轴”的夹角分别叫物方（或像方）视场角。

用助视仪器为什么能看清物体？

眼睛的分辨极限角为 $1'$ ，无论是大而远的物体，还是小而近的物体，只要物体两端对眼睛的张角小于 $1'$ ，眼睛看到的都是一个点，对物体的细节根本不能分辨。但是若在物体与眼睛之间加上助视仪器，对“像”的观察代替对“物”的观察，像对眼睛的张角大于物对眼睛的张角。也就是说用助视仪器可以增大视角，好像物体被拉近了，原来看不清的物体可以看清楚了，因此放大本领是助视仪器的重要光学指标之一。接收器是眼睛的成像系统叫助视仪器。例如：放大镜、显微镜、望远镜等都是助视仪器。

五、什么叫焦深？

1. 何谓焦深？

摄影镜头在拍摄之前要对被摄平面的位置进行像面位置的调整，以便获得清晰的图片，称为调焦。从理想光具组的角度来说，被摄物面位置一定时，其共轭像面的位置原本是唯一确定的，但是由于接收器（观察时是眼睛，摄影时是底片）本身不完善，即使像面沿光轴有些位移，接收器所感觉的像仍然是清晰的。像面沿轴移动的这个允许范围称为几何焦深。几何焦深没有考虑像差的作用，是接收器感觉不到成像不清晰所对应的调焦深度，本来物点对应的像应该是点，当像面在没有对准位置时，像可能是个弥散斑，如果接近器感觉不出它是弥散斑时仍然可以看成是个点，那么像面的最大变化范围就是几何焦深。

2. 焦深跟什么因素有关？

焦深的大小与像点允许的弥散斑直径有关，设弥散斑允许的直径为 z' ，焦深为 $2\Delta'$ ，推导 $2\Delta'$ 与 z' 的关系；如图 2-89(a)所示，

$$\frac{z'}{2\Delta'} = \operatorname{tgu} \quad 2\Delta' = \frac{z'}{\operatorname{tgu}} \quad (2-84)$$

对称型摄影镜头，入瞳面跟物方主平面重合，出瞳跟像方主平面重合，并且入瞳与出瞳直径相等。故

$$\begin{aligned} \text{tgu} &= \frac{\frac{D}{2}}{s'} = \frac{D}{2s'} = \frac{D}{2f'} \cdot \frac{f'}{s'} \\ &= \frac{1}{2F} \cdot \frac{f'}{f' + x'} = \frac{1}{2F(1-\beta)} \end{aligned}$$

其中 $\beta = -x' / f'$ ，并将上边结果代入 (2-84) 式中

$$\frac{z}{2} = 2z F(1-\beta) \quad (2-85)$$

可见焦深 $2z$ 跟弥散斑允许直径 z ，跟摄影镜头光圈的 F 数、跟物与像两平面间的横向放大率 β 有关。

六、什么叫超焦距？

当摄影镜头对无限远景物调焦时，像就成在像方焦平面处，此处就是底片平面，如图 2-89(b)所示，在有限远距离某处如 P 点上的景物在底片上也同时聚成了可以容许的清晰像点（弥散斑），再近的景物就模糊不清了，由离镜头最近清晰位置到无限远处，所包括的景物，都会清晰地成像在底片上。这个最近清晰点到镜头的距离，称为超焦距，以符号 H 表示。

1. 超焦距跟什么因素有关？

图中以 P 为顶点的充满出瞳的光束构成的相似三角形其对应边的关系为

$$\frac{D}{z'} = \frac{H'}{H' - f'}$$

我们的目的是要求出超焦距 H 的表示式，因此必须根据物像关系式与上式建立关系，从而求得 H 的表示式，根据高斯公式

$$\begin{aligned} \frac{1}{H'} - \frac{1}{H} &= \frac{1}{f'} \\ H &= \frac{H'}{H' - f'} \cdot f' = \frac{D}{z'} \cdot f' \\ &= \frac{D}{f'} \cdot \frac{f'^2}{z'} = \frac{f'^2}{F \cdot z'} \quad (2-86) \end{aligned}$$

由式 (2-86) 可知，超焦距 H 与镜头光圈 F 数成反比（跟光圈的相对孔径成正比），一个镜头有多级可变光圈，也就对应着多级超焦距。通常是光圈增大一级，超焦距增大 $\sqrt{2}$ 倍。

在光圈 F 数相同的条件下，超焦距跟镜头的焦距平方 f'^2 成正比，通常是焦距长的镜头其超焦距也大。

超焦距 (H) 跟弥散斑的允许直径 z 成反比。 z 的大小要由光学系统的用途来定。对于普通摄影，当照片上各点的弥散斑对人眼的张角小于人眼的最小分辨角，人眼就感觉弥散斑是个点，认为图像是清晰的。弥散斑对人眼的张角跟弥散斑 z 的大小与观察距离有关。当观察距离确定后（如明视距离），人眼的分辨极限也是一定的，所以 z 也可以认为是一定的。并且它也等于物方弥散斑直径 ($z' = z$)。

2. 超焦距跟景深有什么关系？

为了用超焦距H表示景深公式，将 $l = z/l$ ， $F = \frac{f'}{2a}$ ，（其中，

l 为观察距离，z 为称散斑直径， θ 为眼的分辨极限角，2a 为入瞳直径此处用 D 表示）代到景深公式（2-59）中则

$$\begin{cases} \Delta_1 = \frac{P^2 \epsilon l}{2af' - P\epsilon l} = \frac{FzP^2}{f'^2 - FzP} \\ \Delta_2 = \frac{P^2 \epsilon l}{2af' + P\epsilon l} = \frac{FzP^2}{f'^2 + FzP} \end{cases} \quad (2-87)$$

将（2-86）代入上式

$$\begin{cases} \Delta_1 = \frac{FzP^2}{f'^2 - FzP} = \frac{P^2}{H - P} \\ \Delta_2 = \frac{P^2 Fz}{f'^2 + FzP} = \frac{P^2}{H + P} \end{cases} \quad (2-88)$$

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = \frac{2HP^2}{H^2 - P^2}$$

显然超焦距 H 值愈大，景深 就愈小，反之亦然。

如图 2-73 所示，近景与远景位置（用绝对值）为 $P_2 = P - \Delta_2$ ， $P_1 = P + \Delta_1$ ，并将（2-88）式代入则

$$\begin{cases} P_2 = P - \Delta_2 = P - \frac{P^2}{H + P} = \frac{HP}{H + P} \\ P_1 = \Delta_1 + P = \frac{P^2}{H - P} + P = \frac{HP}{H - P} \end{cases} \quad (2-90)$$

3. 超焦距有什么应用？

利用超焦距可以扩大景深范围。若将物镜调焦在超焦距上，即 $P = H$ ，由（2-90）式可知，远景位置 $P_1 = \frac{H}{2}$ ，近景位置

$$P_2 = \frac{H}{2}$$

显而易见，镜头调焦在超焦距 H 上时，就可以获得最大限度的景深。

应用超焦距原理，按着超焦距表，调焦在超焦距位置，在短瞬间就可以将最大景深范围内的动体目标抢拍下来（中间不必再调焦）。通常特写不要背景时，不能用超焦距，因为用超焦距，会使背景清晰而主体物不突出。

4. 超焦距表的内容是什么？

表 2-8 所示为超焦距表，镜头的超焦距通常以米为单位。从表中可迅速查到，多大焦距的镜头，光圈为某级时对应的超焦距值。焦距的单位为毫米。

表 2-8 超焦距表

| 焦距 (毫米) | 35 | 50 | 58 | 65 | 75 | 80 | 90 | 105 | 125 | 135 | 150 | 180 |
|------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 超焦距 (米) | | | | | | | | | | | | |
| 光圈数 | | | | | | | | | | | | |
| F _{1.4} | 25 | 35.71 | 41.42 | 46.43 | 53.75 | 57.14 | - | - | - | - | - | - |
| F ₂ | 17.5 | 25 | 29 | 32.50 | 37.50 | 40.00 | 15.00 | 52.50 | - | - | - | - |
| F _{2.8} | 12.5 | 17.85 | 20.71 | 23.21 | 26.78 | 28.57 | 32.14 | 37.50 | 44.54 | 48.21 | 53.57 | - |
| F _{3.5} | 10 | 14.27 | 16.57 | 18.57 | 21.43 | 22.85 | 25.71 | 30.00 | 35.71 | 38.57 | 42.85 | 51.43 |

(续)

| | | | | | | | | | | | | |
|------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F ₄ | 8.75 | 12.5 | 14.50 | 16.25 | 18.75 | 20.00 | 22.50 | 26.25 | 31.25 | 33.75 | 37.50 | 45.00 |
| F _{5.6} | 6.25 | 8.94 | 10.35 | 11.60 | 13.39 | 14.28 | 16.07 | 18.75 | 22.32 | 24.10 | 26.78 | 32.14 |
| F ₈ | 4.37 | 6.25 | 7.25 | 8.12 | 9.21 | 10.00 | 11.25 | 13.12 | 15.63 | 16.87 | 18.75 | 22.50 |
| F ₁₁ | 3.18 | 4.54 | 5.27 | 5.90 | 6.81 | 7.27 | 8.18 | 9.54 | 11.36 | 12.27 | 13.64 | 16.36 |
| F ₁₆ | 2.18 | 3.12 | 3.62 | 4.06 | 4.68 | 5.00 | 5.62 | 6.56 | 7.81 | 8.43 | 9.37 | 11.25 |
| F ₂₂ | 1.59 | 2.27 | 2.63 | 2.95 | 3.40 | 3.64 | 4.09 | 4.77 | 5.68 | 6.13 | 6.82 | 8.18 |
| F ₃₂ | 1.09 | 1.56 | 1.81 | 2.03 | 2.34 | 2.50 | 2.81 | 3.28 | 3.90 | 4.21 | 4.69 | 5.62 |

5. 超焦距的实质是什么？

超焦距的实质就是：摄影镜头调焦至无限远时的近景位置。在第二章-第六节-三-8中导出式为

$$p_2 = \frac{2a}{\epsilon}$$

将此式稍加变化就可以得到(2-86)式的形式，其中 $\epsilon = \frac{z}{l} = \frac{z}{f'}$ ，在

正确观察距离下，由图2-74可知， $l = p = f$ ； $F = \frac{f'}{2a}$ ， $2a = D$ ，

则

$$\begin{aligned}
 p_2 &= \frac{2a}{\epsilon} = \frac{2a}{\frac{z}{f'}} = \frac{2a}{z} \cdot f' \\
 &= \frac{2a}{f'} \cdot \frac{f'^2}{z} = \frac{f'^2}{Fz} \\
 &= H
 \end{aligned}$$

从以上推导出的公式：摄影镜头聚光本领公式(2-70)、(2-71)、(2-72)；摄影镜头分辨极限公式(2-78)；摄影镜头焦深公式(2-85)；超焦距公式(2-56)；景深公式(2-87)等。可知相对孔径对于描述摄影镜头光学特性是举足轻重的。

第三章 摄影中的像差

第一节 单色像差有几种？

一、像差怎样分类？

1. 什么叫像差？产生像差的原因是什么？

对于摄影镜头的要求，是要获得正确的像。最简单的情况，物是垂直光轴的平面，理想的像应该是：

物面上每一发光点应该对应一个清晰像点；

所有像点必须位于同一垂轴像平面内；

各像点的放大率必须是常数；

像的各部分应该保持与物有同样的彩色。

满足不了 和 的要求，会减弱像的清晰度；实现不了 和 的条件像就会变形；破坏了条件 会使像出现不正确的彩色，而且也使像模糊。所有这些像的缺点叫做像差。也就是实际像相对于理想像的偏差（几何形状、彩色、清晰度等）为像差。

像差是由摄影镜头的物理条件造成的。例如，组成摄影镜头的各镜片的形状（ r ），光学材料（ n ），镜片的厚度（ d ）及各镜片的间距等都直接影响着像差的大小。

2. 像差怎样分类？

按照物点的位置可分为轴上点和轴外点，它们的像差是不同的。轴上点的像差只与光束孔径有关；轴外点的像差，有的只与视场有关，有的则与视场和孔径都有关；按照光源的性质，光学系统以单色光成像时产生的像差称为单色像差；但是对于普通摄影通常是对白光成像，白光是由不同波长的色光组成，而光学材料对不同波长的光具有不同的折射率，故不同波长的光其像的大小和位置各不相同。于是又引入了色像差（简称色差）的概念。

像差又有初级像差和高级像差之别。各种像差都跟光学系统的结构及物体位置和大小有关。当后者一定时，即光学系统对一定位置和大小物体成像，像差则是光学系统结构（ r, d, n ）的函数，但是由于关系复杂而无法写出具体的函数形式。为了研究方便，常把像差展开成级数。

例如球差 l 可展开成光线入射高度 h 的级数

$$l = A_1 h^2 + A_2 h^4 + \dots$$

式中第一项称初级球差，第二项称第二级球差，依次类推，二级以上球差之和称为高级球差。

单个球面透镜的像差是客观存在的，只能减小，不能完全消除。因此镜头通常都是复杂的透镜组，目的在于校正像差。不同的镜头有不同的像差要求，故而有不同的光学结构。各种摄影镜头其结构形式由简到繁，性能由低到高的发展过程也就是像差理论的发展过程。

3. 单色像差有几种？

单色像差可分为五种：

球面像差简称球差（是轴上像差）；

慧形像差简称慧差（跟孔径和视场都有关）；

像散差简称像散；

像场弯曲简称场曲；

畸变。

到 都是轴外像差； 与 是大孔径引起的； 、 、 是大视场引起的； 、 、 破坏了光束的同心性； 使像面弯曲； 破坏了物像的几何上的相似性。以上五种像差彼此有密切联系，往往同时存在。除了单色像差外，对于非单色物，同时也存在色差。我们主要介绍单色像差和色差。

二、什么叫球差？怎样消除？

1. 球差产生的条件是什么？

轴上物点发出的宽光束通过透镜成像，能产生球差。这种像差主要是由于透镜表面为球面而产生的像差故而称为球差。

2. 由于球差的存在物点的像是什么样的？

我们知道物点的理想像也是一个点，但是由于球差的存在物点的像却是一个弥散斑。例如，当一个折射球面孔径较大时，主光轴上一物点发出的宽光束经球面折射后不再交于一点，不同孔径的光线交于不同点，以近轴光线的理想像点为坐标原点，其它孔径光线的像点可能在原点左边或右边，以最大孔径光线的像点至坐标原点间的距离来表示轴向球差的大小，这个距离在坐标点左边为负，居右为正。接收屏在空间沿着主光轴移动，接收到的弥散斑都是圆形的，位置不同，弥散斑的直径也不同。

轴向球差的大小跟折射系统（球面、透镜、透镜组等）的折射率、入射光线的孔径角（或入射高度）、透镜的曲率半径等有关。

3. 怎样校正球差？

什么叫配曲法？

透镜的焦距是其折射率和曲率半径的函数，对于给定的光学材料，具有相同焦距的透镜可以有不同的曲率比，故选择合适的曲率比可以减小其球差，但不能完全消除。正透镜在相对孔径不太大时、对无限远物点成像，满足下列条件时球差最小：

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{4 + n - 2n^2}{n(1 + 2n)} \quad (3-1)$$

其中 r_1 ， r_2 分别是透镜前后两球面的曲率半径， n 是透镜的折射率。这种选择 r_1 与 r_2 比值来减小球差的方法叫做配曲法。

什么叫消球差复合透镜？

由于正透镜具有负球差，负透镜具有正球差，因此，由正负透镜组成的分离式透镜组及双胶合透镜组，可以校正某一高度（孔径）的球差。

什么叫非球面系统？

对于大口径摄影镜头可以用非球面透镜来消球差。例如由凹面反射镜和负透镜组成的包沃斯——马克苏托夫折反系统和由施密特校正板和球面反射镜组成的消球差系统等都是常见的非球面消球差系统。

但是，无论是双分离的透镜组、双胶合透镜组、非球面系统，还是更复杂的光学系统，通常只能对某一入射高度的非近轴光线消球差，不能同时对各种入射高度的光线消球差。因此，摄影镜头总有一定的剩余球差存在。

通过具体计算得知：单透镜孔径不大时，初级球差和实际球差非常接近，高级球差很小，只用初级球差就可以表征其全部球差。

4. 什么叫球差曲线？

完全消除摄影镜头的所有像差是不可能的，也是不必要的。各种摄影镜头都有特定的用途，因此某种镜头只需要考虑某种类型的像差。例如显微物镜的被摄对象是傍轴小物，但要求孔径很大，主要的像差是球差和慧差；航测或翻拍镜头要求视场要大，而且对物像的相似性要求很严，因此，重点要消除场曲和畸变。另外，由于接收器（眼睛或底片）的分辨本领有一定限度，所以只需将像差减小到接收器不能分辨的程度就够了。所以各种摄影镜头都残存着没有消除的剩余像差，各种像差都可用曲线形像而直观地描述。当你翻开光学镜头手册，首先就会看到每一种镜头的各种像差曲线。

球差曲线是以球差值为横坐标，以光线的入射高度为纵坐标，通常是对边缘光线（最大入射高度光线）消球差（即此处球差为零），在 0.707 高度处球差最大，并在原点处曲线和纵轴相切，因此，根据最大高度、0.707 高度和原点三处的球差值就可以较精确的将球差曲线画出来。从曲线中可以看出任意入射高度光线的球差值。

5. 摄影镜头的高级球差决定于什么？

通过对球差的计算可知：

具有二级球差的光学系统对边缘光线校正球差，只需对某一入射高度的光线进行计算，求出这个带的球差就可以了。

之所以对某一带校正球差，是因为该带上的初级球差和高级球差能相互抵消，因此校正球差系统中必须是初级球差和高级差异号。

当光学系统对边缘光线校正球差时，在 0.707 带有最大剩余球差，此带球差约是边缘光线二级球差的四分之一。因此高级球差越大，带球差亦越大。也就是当光学系统的边缘光球差校正为零时，其带球差就代表高级球差的大小。经验证明，当摄影镜头的结构型式选定后，高级球差基本不变或变化很小，因此摄影镜头的相对孔径受到高级球差的限制，为了使带球差在允许范围内，一定形式的摄影镜头只能具有一定的相对口径，欲提高相对孔径必须使其结构复杂化，以便有更多因子变化来减小球差。

高级球差决定于结构形式，尽可能采用高级球差小的结构。当结构形式确定后，只能控制初级球差使之和高级球差相补偿。但初级球差和高级球差按不同因次变化，因此，只能对一个带或两个带实现球差的校正，其它带上必然还有剩余球差。对高级球差的进一步研究得知，引起高级球差的原因为：

(a) 球面固有特性引起的高级球差叫做本征球差；(b) 由入射光束已有的像差引起的高级球差，叫做衍生高级球差。

三、什么叫慧差？怎样消除？

1. 什么叫慧差？

傍轴物点发出的宽光束经光具组后在像平面上不再交于一点而是形如慧星(或梨状)的亮斑,这种像差称为慧形像差,简称慧差,如图 3-1(a)所示。如图 3-1(b)所示,由物点 P 发出的主光线 P0 经光具组后与像平面交于 P' (理想像点)。为了描述有慧差时光束的特点,我们在入射光瞳面上作一系列同心圆,如图(c)所示,分别以 1, 2, 3, 4, ...表示,计算结果表明,经过各个圆周的光线在像平面上仍然落在一系列圆周 1、2、3、4, ...上,不过这些圆不再是同心圆,这些圆的圆心在同一条直线上,半径越大的圆,其中心离 P 越远,这样就形成了如慧星般的光斑,如图(d)所示。

2. 产生慧差的条件是什么？

近轴物、宽光束的条件下可产生慧差。它是轴外像差之一。对同一视场而言,孔径不同慧差也不同,也就是说它的值决定于光束的宽度和视场的大小。

慧差和球差都是由宽光束引起的。因此球差大的系统,往往慧差也大,两者通常混在一起,只有在轴上物点的球差已消除时,才可明显观察到傍轴物点的慧差。

3. 如何消除慧差？

利用配曲法可消除单个透镜的慧差,也可以用胶合透镜组来消除慧差。但消球差和消慧差所要求的条件往往不一致,因此两者不易同时消除。

慧差值的大小与正负跟透镜的形状有密切关系,同时也与光阑的位置有关,因此选择合适形状的透镜与恰当的光阑位置可以消慧差。

四、什么叫像散？怎样消除？

1. 图 3-2 所示为 Q 点通过有像散光学系统成像时的情形, Q 为物平面远离光轴的一物点, Z 为过 Q 点的主光线(倾角很大), 将一光屏, 平行于物平面沿主光轴移动, 屏的位置不同, Q 点的成像光束截面形状有很大不同。如上图所示, 在位置 1 时, 成像光束截面为长轴垂直于子午面的椭圆; 移到位置 2 时为垂直于子午面的短线; 在位置 3 时又成为一长轴跟子午面垂直的椭圆; 在位置 4 时形成一圆斑, 叫明晰圆, 可以认为这里是光束聚焦最清晰的地方, 是放置照相底片或屏幕的最佳位置; 在位置 5 时形成一长轴在子午面内的椭圆; 在位置 6 时, 形成一在子午面内的短线; 在位置 7 时又扩散成跟在位置 5 时相似的椭圆。上述两条短线(焦线)能量最集中, 它们是 Q 点的两个像。

2. 怎样量度像散的大小？

光学系统像散的大小, 常用图 3-2 中两焦线在光轴上投影点间的距离 ST 表示。T, S 它们到理想像面的距离分别为 X'_T 、 X'_S , 则

$$ST = X'_T - X'_S$$

像散的正负: 以理想像面为标准, 在右为正, 居左为负。

3. 像散产生的原因是什么？

像散产生的原因是光束通过光学系统后其单心性被破坏，即原来的球面波已转变为非球面波了。以图 3-3 加以说明： ox 是两种介质的分界面，两种介质的折射率分别为 n_1 、 n_2 ，且 $n_1 > n_2$ ， P 是入射光束的顶点， 1 与 2 为入射光束的边缘光线， P 是它们折射线反向延长线的交点， P_1 与 P_2 是两条延长线分别跟 oy 轴的交点。因为光束是立体的，所以必须考虑光束中光线的空间分布。要考虑光源 P 发出的狭窄的空间光束，可将该图绕 oy 轴转过一个小的角度，则顶点为 P 的三角形 PA_1A_2 展成一个单心光束。折射光束中所有光线的延长线都交 oy 轴于线段 P_1P_2 的范围内。另外，当图绕 oy 轴转过这一小角度时， P 的轨迹是一小弧线可近似为一小段直线，折射光束中所有折射线的反向延长线都交于其上的各点。可见，以 P 为顶点的入射光束，经界面折射后，与 P 点对应的像，不是一个点，而是两条短线，一条是在子午面内的 P_1P_1 叫做弧矢像线，另一条是 P 的轨迹垂直于子午面，叫做子午像线。也就是说成像的光束已失去了单心性。

什么叫主截面？

通过光具组主光轴的任何一个平面都为主截面。

什么叫子午面？

物点所在的主截面称为子午面。

4. 有像散时，多个物点的像如何？

轴上点不存在像散，像散是轴外像差中的一种，物点离主光轴越远，其像散越显著。如果物体是由离轴距离不同的多个点组成，则各物点的弧矢像线与子午像线的长短不一样，离轴越远的物点，对应的两像线就越长。

5. 像散的大小跟什么有关系？

像散的大小，与源光束相对于光轴的倾角、相邻介质的折射率、折射面的曲率半径都有关系，并且正透镜的像散差与负透镜的像散差其符号相反。所以，适当地选配系统各球面的曲率，各介质的折射率，以及合理地选定有效光阑的位置等，就能得到对视场角为某一定值的源光束像散为零的光学系统。这样系统叫消像散系统，但它不能对所有方向的源光束都同时消像散。

远轴物点用粗光束成像时，不仅有像散产生，同时还将伴随着慧差和轴外球差的产生。

五、什么叫场曲？

轴上点，在光束很窄时，可理想成像，但在宽光束条件下会产生球差；近轴点，宽光束条件下产生慧差；远轴点窄光束成像时会产生像散；远轴点宽光束成像会产生像散、慧差和轴外球差。

由图 3-3 可知，当 $A_1P'A_2$ 绕 Y 轴旋转一小角度时， P 的轨迹是一小弧线，小弧所在的面则是一曲面。在有像散的条件下，一个物平面所对应的子午像面、弧矢像面和明晰圆的轨迹都是以主轴为对称轴的曲面。在像散被消除之后，上述三个曲面重合为一个像面，但这个像面仍是一个曲面，我们把这种现象称为像面弯曲，或简称场曲。有场曲生存

在时，在理想像平面上呈现不清晰的像，每一个像点在该平面上所成的都是一个弥散圆。

场曲的大小跟透镜的形状及光束截面粗细无关，而跟系统中各透镜的焦距的分配及其折射率有关。因此，消场曲的光学系统，如摄影镜头都必须复杂的复杂的光学系统。

六、什么叫畸变？

1. 什么叫畸变？

前面讲的几种像差共同点是像点被理想像面上不同形状的弥散斑所代替，破坏了成像的清晰度。但是畸变却不影响像的清晰度，只影响像与物的几何相似性。

2. 畸变产生的原因是什么？

由于光学系统对共轭面上不同高度的物体有不同的横向放大率，而使像跟物不相似。当共轭平面上的横向放大率随视场角的增大而变大时，产生的畸变为正畸变（枕形畸变）；反之，为负畸变（桶形畸变）。

3. 如何利用畸变？

在多数情况下必须消除畸变，例如航测或翻拍等都需要像与物严格相似。但有时不但允许它存在，而且还想方设法造成巨大的畸变，以获得其它方面的益处。例如，由拍摄宽银幕电影照相物镜所得的像，是严重畸变的，像的水平方向与垂直方向的比例不似原物，矮胖变为瘦长；广阔的田野在底片上只占很窄一小条，因此，才能将水平方向较大范围内的景物拍摄在一般的胶片上，放映这种宽银幕电影时，只要用一个与摄影光学系统的畸变在绝对值上相等而符号相反的光学系统作放映系统即可。若将一般电影片用宽银幕放映机放映，圆将变成长轴在水平方向的椭圆。

4. 如何消除畸变？

在通常情况下，摄影镜头是需要消除畸变的。

什么叫无畸变正切条件？

上图是小孔成像光路图，图中每对共轭点的连线都是直线，所以对于每对特定的共轭面，其横向放大率为常数，不同点的共轭面有不同的常数。即：

$$= y' / y = S' \tan \theta' / S \tan \theta = \text{常数} = S' / S = \text{常数} \quad (3-3)$$

可见，小孔成像时，只要物距（ S ）与像距（ S' ）一定，不论物点距光轴远近或光线跟光轴的夹角如何，横向放大率恒为常数；满足此条件，就能消畸变。上式叫做无畸变正切条件。

什么样光学系统消畸变？

在小孔（孔径光阑）两侧，对称地放置两个透镜或透镜组（对称系统）时，在垂轴放大率为 -1 的一对共轭平面上，可完全无畸变成像。不仅无畸变，也无慧差和放大率色差。甚至在物面位于无限远时或

$\theta < 1$ 时，仍在一定程度上保留这些特点，因此现代摄影镜头多采用对称型或亚对称型的光学结构。

如果一个光具组未经任何校正，一般地说上述五种像差将同时出现。但在一定条件下，也可能只有一种或几种像差特别显著。例如物点

在主轴上时，其它像差都不出现，只有球差单独出现。光束愈宽，球差愈显著；近轴物点时，除球差外，慧差将显著，哪怕光束不太宽，慧差也比球差显著；远轴物点时，在细光束条件下，像散将显著，球差与慧差都不显著；至于场曲和畸变，仅在物面较大时才比较显著，在光束较细时，其它像差都变为次要的了。

对摄影镜头而言，物面比较大，光束也比较宽，五种像差都很显著。因此，它是大像差系统，对各种像差都要校正到允许程度。每一折射面对各种像差的贡献都要计算，根据校正像差的需要，确定摄影镜头的光学结构 (r, n, d) 及光阑位置，镜片的数目等。

第二节 什么叫色差？如何消除？

一、什么叫位置色差？

摄影镜头通常是对白光成像。白光是由各种单色光组成，光学材料对不同色光折射率不同，波长愈短折射率愈大，波长愈长折射率愈小。所以不同色光所成的像其位置和大小各不相同而产生色像差。

1. 薄透镜的位置色差如何？

由薄透镜焦距公式 $1/f = (n-1)(1/r_1 - 1/r_2)$ 可知，同一薄透镜对不同色光，对应着不同焦距。由高斯公式 $1/S = 1/f + 1/S'$ 可知，当透镜对一物体成像时，由于各种色光对应的焦 f 值不同，所以各色光所成的像位置就不同。按色光的波长由短到长，它们的像点离开透镜由近到远地排列在光轴上，这种现象就是位置色差。即使在光学系统的近轴区，也同样存在着位置色差。

如图 3-5 所示，由物点 P 发出白光，经透镜后，不同色光在像空间光轴上形成不同位置的像点。以 C 表示红光，因折射率小，其像点 P_C 离光学系统最后折射面为最远；以 F 表示蓝光，折射率大，其像点 P_F 最近；以 D 表示绿光，其像点位置居中。如果用一屏在 1, 2, 3 三个位置观看：在位置 1 时的弥散斑，红在外，蓝在内，绿居中；在位置 2 时，红在外，绿在内，蓝居中；在位置 3 时，蓝在外，红在内，绿居中。这种像差现象使轴上点不能成像为一白光点，而成为彩色弥散斑。

2. 怎样表示位置色差？

为以数值表示色差，首先应确定对哪两种色光来考虑色差，即以这两种消色差谱线中波长较长的谱线的像点位置为基准。如果以 λ_1 、 λ_2 表示消色差谱线的波长，且 $\lambda_1 < \lambda_2$ ，以 S'_{λ_1} 、 S'_{λ_2} 表示两消色谱线的像距，光学系统近轴区的位置色差以 $L'_{\lambda_1 \lambda_2}$ 表示则

$$L'_{\lambda_1 \lambda_2} = S'_{\lambda_1} - S'_{\lambda_2} \quad (3-4)$$

3. 消位置色差谱线如何选择？

消色差谱线要依光学仪器的使用目的来选择。如普通照相底片，对蓝光很灵敏，所以照相物镜要对光谱蓝端的谱线消色差，通常选择为 4340 Å 的蓝色和 5893 Å 的黄光消色差；在靠近可见光谱区边缘的两种色光为红（以 C 表示）和蓝（以 F 表示）；人眼最敏感的为黄绿光，因此目视仪器通常是对黄绿光（D, d, 和 e 光任选其一）计算和校正单色像差，对红光和蓝光校正色差。

为求得位置色差的精确值，首先得对要求校正色差的两种色光，进行光路计算。求出最后的像距 S'_{λ_1} 与 S'_{λ_2} ，然后将它们代入 (3-4) 式既可求得 $L'_{\lambda_1 \lambda_2}$ 的值。

4. 远轴区的位置色差如何？

图 3-5 所示为近轴区的情形。如果从 P 点发出的与光轴成有限角度（非近轴区）的白光，它也产生色差。对于这条实际白光，其 F 光和 C 光经光学系统折射后与光轴的交点，因各自的球差而不能与近轴光的像

点 S_F 与 S_C 相重合，两色光的球差不等，其位置色差也与近轴光的位置色差不同。可见，位置色差的大小是随孔径角（或入射高度）的不同而有所改变。光学系统（包括摄影镜头）一般只能对光束中某一入射高度光线校正色差。通常说的消色差系统，实际指的就是对两种色光校正了位置色差。色差值为负叫做色差校正不足，色差值为正叫做色差校正过头。

5. 什么叫色球差？

由于各色光线在同一入射高度上的球差各不相同，光学系统对某一入射高度的光线校正了位置色差之后，在其它入射高度时还会有剩余色差。为了全面地了解光学系统的色差情况，除了核算某一入射高度光线是否校正了位置色差以外，还必须算出近轴光和边缘光的位置色差。这些都必须通过对 F 光和 C 光的光路计算来实现。

例如在 0.707 带对 F 光和 C 光校正了位置色差，但仍存在 F 光和 C 光的球差。而且两者并不相等，其差值称为色球差。色球差在光学系统的色差校正中是困难的，一般光学系统对这种像差并不要求严格校正。

二、如何消除位置色差？

1. 位置色差与什么因素有关？

已知结构的光学系统，其初级位置色差可表示成光学系统每一个折射面的分布之和，这对已知结构的实际光学系统（如摄影镜头），用来讨论和计算初级位置色差分布是很方便的。

当光学系统的光学结构是未知时，如要设计一个摄影镜头，因初级位置色差与光学系统结构之间的关系表现得不明显，不能用上述方法直接求得满足一定色差要求的光学系统的初始解。在此种情况下，需把色差表示成每一透镜的分布之和。当把透镜厚度略去，所得到薄透镜系统的色差分布，其形式是非常简单的。从推得的结果知道，初级位置色差决定于透镜的光焦度和制造透镜所用玻璃的光学特性。在光焦度一定时，玻璃的阿贝常数愈大，色差愈小；通常情况下，正透镜产生负色差，负透镜产生正色差。因此，消色差的光学系统通常都是由正负透镜组成，以使它们的色差互相补偿。每块透镜对色差的贡献除与光焦度和阿贝常数有关外，还跟透镜在光路中的位置，即光线的入射高度有关。

2. 双胶合系统与双分离系统的消色差条件是什么？

由两块相互接触或以极小的空气间隙分离的薄透镜组，分别称为双胶合系统与双分离系统。经过推导，上述系统的消色差条件为：

$$\varphi_1 = \frac{v_1}{v_1 - v_2} \varphi$$
$$\varphi_2 = \frac{-v_2}{v_1 - v_2} \varphi$$

式中 φ_1 与 φ_2 分别为两个薄透镜的光焦度； v_1 与 v_2 分别为两个透镜玻璃的阿贝常数； φ 为整个系统的总光焦度。当光焦度 φ 和两种玻璃已确定时，由式（3-5）算出为消色差而两透镜所应有的光焦度。由于 v_1 和 v_2 都为正值，所以 φ_1 与 φ_2 必须反号，所有只有正、负透镜组合起来的系统，才

能消色差。同时，为此目的而相互接触的正透镜与负透镜必须是由阿贝数不同的光学玻璃组成。通常是正透镜用冕玻璃，负透镜用火石玻璃，并令正透镜第二个面与负透镜第一个面有相同的曲率半径；然后用特种树胶（如加拿大树胶）将两个透镜胶合在一起，构成双胶合透镜，如图 3-6(a)、(b)、(c) 所示。

这种透镜组，在玻璃给定的条件下，通过适当地分配两透镜光焦距的方法，可消色差；通过适当改变各面曲率半径的方法，可消球差；若两透镜的材料可任选时，则它也可同时消慧差。有时物镜需要保留一定剩余色差，以便与其它光学零件的色差相补偿，如补偿反射棱镜的色差。

三、什么叫放大率色差？

1. 什么叫放大率色差？

许多光学系统，例如摄影镜头等都是由若干透镜组成，其横向放大率等于各个透镜的横向放大率之积，放大率色差跟放大率关系密切，为简单我们只分析一个透镜的情况。我们知道放大率与焦距的关系式为：

$$= -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f'}$$

而透镜焦距与折射率关系为

$$\frac{1}{f'} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

折射率 n 的大小又与光的颜色有关。可见，透镜对不同色光有不同的放大率，因此，白光通过透镜可形成一系列的与各色光对应的高度不同，位置也不一致的像，而在其中任一色光所成的像面上只能得到一个有彩边的“像”。这种色差，称为放大率色差。由于它表现在垂轴方向，因而也叫垂轴色差，或叫倍率色差。如果对透镜位置色差已校正（对 F 光与 C 光），那么各色光的像可成在同一像平面上，但它们的像高却不同，如图 3-7 所示。

2. 如何量度倍率色差？

图 3-7 所示的 C 光、 F 光、 D 光的像点可以看做是各色光的主光线跟像面的交点。但是，在位置色差没有校正时，不同色光的像是不能成于同一像面上的，尤其有二极谱线存在时，就更不能使它们成于同一像面上，这时不论各色光的像高是否相等，都不足以说明倍率色差是否已经消除。为使倍率色差的定义有明确表示，须将各色像同时投影到高斯像面上来量度像高。光学系统的放大率色差可用两个像的高度差 $y'_F - y'_C$ 来表示；或相应垂轴放大率之差 $\beta_F - \beta_C$ 来表示；但常见的是用这些差值占总像高 y' 或放大率 β 的百分数表示为

$$\frac{y'_F - y'_C}{y'} = \frac{\Delta y'}{y'} \quad (3-6)$$

$$\frac{\beta_F - \beta_C}{\beta} = \frac{\Delta \beta}{\beta}$$

式中 y' 和 β 分别为各种色光对理想像面的平均像高和平均垂直放大率。

3. 倍率色差与光阑的位置有什么关系？

倍率色差和光阑位置有密切关系，比较图 3-8 与图 3-7 可见：光阑在透镜之前，由于 $n_F > n_C$ ，F 光比 C 光偏折严重， y_F 比 y_C 小，倍率色差为负 ($y_F - y_C < 0$)；光阑在透镜之后，情况正好相反。

4. 如何校正倍率色差？

倍率色差是在高斯面上量度的，故是垂轴（横向）像差的一种。倍率色差严重时，物体的像有彩色边缘。即各种色光的轴外点不重合。因此，倍率色差破坏轴外点的清晰度，造成白光像的模糊。大视场光学系统必须校正倍率色差。倍率色差的校正是指所规定的两种色光，在某一视场使倍率色差为零。倍率色差为负值时为校正不足，为正值时则为校正过头。

5. 如何校正倍率色差？

什么样光学系统能同时校正位置色差和倍率色差？如图 3-6 所示的双胶合透镜组，在校正了位置色差的同时也校正了倍率色差；具有一定间隔的两个或若干个薄透镜组，能同时校正倍率色差和位置色差的条件为：

$$\begin{cases} \frac{\phi_1}{v_1} + \frac{\phi_2}{v_2} = 0 \\ \frac{\phi_3}{v_3} + \frac{\phi_4}{v_4} = 0 \end{cases} \quad (3-7)$$

式中 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 、 ϕ_4 分别为图 3-9 中各透镜的光焦度； v_1 、 v_2 、 v_3 、 v_4 分别为它们所用玻璃的阿贝常数。

为什么对称系统能校正倍率色差？

图 3-10 所示，是一种对称光学系统，当 $\beta = -1$ 时共轭面上的像，不管系统的半组是否校正了位置色差，整个系统的倍率色差与其它垂轴像差一样，可以自动得到校正，因为在对称面上倍率色差可互相抵消。

四、什么叫消色差系统？

能使两种不同颜色光有相同的成像位置的光学系统，称为消色差系统；倍率色差和位置色差同时得到校正的光学系统，称为稳定消色差系统；对某三种颜色的光校正色差的光学系统称为复消色差系统；对四种颜色的光校正色差的光学系统称为超消色差系统。不过后两种系统，只在极特殊情况下才采用。

五、校正像差跟光学玻璃有什么关系？

1. 什么叫阿贝常数？

阿贝常数的定义式为：

$$v = \frac{(n_D - 1)}{(n_F - n_C)} \quad (3-8)$$

式中 v 称为阿贝常数或平均色散系数； n_D 为光学玻璃对钠黄光的折射率，

在通常情况下，常用它作为介质在可见光范围内的平均折射率，通常所说某种光学材料折射率多大就以它表示； n_F 与 n_C 是该种玻璃对F光与C光的折射率。由于白光是由不同波长的单色光组成，对于同一种透明介质，不同波长的色光具有不同折射率。实验证明：波长愈长，折射率愈低，波长愈短折射率愈高。因此，红光的折射率 n_C 小于蓝光的折射率 n_F 。

在光学材料的折射特性中常以折射率 n 的大小来表示，在折射率中又以D光或d光的折射率 n_D 或 nd ，以及F光与C光的折射率差(n_F-n_C)作为主要特征。因为F光和C光接近可见光谱区的两端，D光与d光在

其中间，比较接近人眼最灵敏的波长 5550Å ，实际上更接近这个波长。 n_D 作为平均折射率， n_F-n_C 作为平均色散。阿贝常数也叫做平均色散系数。对于某种特定的玻璃它是个常数，对于不同的玻璃它是不同的常数， v 值愈大，色散愈低，反之亦然。

2. 什么叫光学玻璃的 $n_D \sim v_D$ 图？

一个摄影镜头的成像质量，完全取决于其像差的校正程度，像差又与光学玻璃折射率及阿贝常数紧密相关。为了设计高质量的摄影镜头，需要多种高质量的光学玻璃。光学玻璃大体上分为两大类：冕玻璃以K表示；火石玻璃以F表示；每一类中又分为多种，每一种中又分许多牌号。例如冕玻璃可分为：轻冕(QK)、冕(K)、磷冕(PK)、钡冕(BaK)、重冕(ZK)、镧冕(LaK)等；火石玻璃可分为：冕火石(KF)、轻火石(QF)、火石(F)、钡火石(BaF)、重钡火石(ZBaF)、重火石(ZF)、镧火石(LaF)、特种火石(TF)等；如冕玻璃K可分为K1、K2、...、K12等，图3-11所示为我国光学玻璃 $n_D \sim v_D$ 图。

通常情况下冕玻璃为低折射率，低色散；火石玻璃为高折射率，高色散，从 $n_D \sim v_D$ 图中就可见到这种情况，这对高性能摄影镜头的设计是有一定限制的。但目前已生产了许多高折射率，低色散的光学玻璃，如LaK玻璃，这对光学设计有很大的促进作用。

图3-12，所示为几种光学玻璃的折射率与波长关系的实验曲线，这是正常色散曲线，同一种玻璃对长波长的光折射率低，对短波长的光折射率高。

在光学中以夫琅和费谱线作为特征单色谱线，常用的颜色、符号、波长及产生这些谱线的元素如表3-1所示。

表3-1 各种颜色代表线

| 颜色 | 红 | | 黄 | | 绿 | 兰 | | | 紫 |
|-------|------------|------|------------|------|------|------|------|------|------|
| 谱线代号 | A | C | D | d | e | F | g | G | h |
| 元素 | 钾双线 中间值 | H | 钠双线 中间值 | He | Hg | H | Hg | H | Hg |
| 波长(Å) | 7682 | 6563 | 5893 | 5876 | 5461 | 4861 | 4358 | 4340 | 4047 |

六、什么叫二级谱线？如何校正？

1. 什么叫二级谱线？

一般消色差光学系统只是对两种色光校正位置色差，当光学系统已对波长分别为 λ_1 、 λ_2 的两种色光校正了位置色差，那么这两种色光的像就会有相同的位置，如果这个共同的位置相对于第三种色光 λ_3 像的位置还有差异，这个位置差就称为二级谱线。

对于普通摄影镜头，对于二级谱线并不严格要求，但长焦制版物镜及高倍显微物镜等都必须考虑二级谱线。消除二级谱线的光学系统就是对三种颜色光校正色差的光学系统即复消色差系统。

2. 如何消除二级谱线？

二级谱线的校正比较困难的，但不是不可能的。通过对相接触的薄透镜系统校正二级光谱的可能性的讨论知道：两块玻璃的相对色散必须相同。对于波长分别为 λ_1 与 λ_2 的两种光的部分色散为 $n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}$ ；相对色散为 $(n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}) / (n_F - n_C)$ 。从消色差要求出发，希望两块玻璃的阿贝常数相差要大，同时满足相对色散相同，阿贝常数相差大的两种玻璃目前难以找到。通过讨论还知道，双胶合透镜其焦距一定时，二级谱线跟其结构无关，而且对各种玻璃差不多是一个常数，这是由光学玻璃的特性所决定的。因此，用普通玻璃制成的消色差系统，总存在一定程度的二级谱线。

用萤石作为透镜材料，可以取得校正二级谱线的良好效果。但具有良好光学均匀性的较大萤石极少，一般只用它制造消二级谱线的显微物镜。

如果用三块相距很近的薄透镜，总可以把第一与第三两透镜的总体看做一种新玻璃，并使它与第二块透镜的玻璃的平均色散相同。而它们的阿贝常数相差大。这种结构，能得到复消色差解，但相对孔径不能太大。

在光学系统中加一组无焦系统可用以补偿整个系统的二级谱线。

七、怎选择消像差谱线？

1. 选择消像差谱线的原则是什么？光学系统消像差谱线选择问题和许多因素有关，当仪器的整体方案确定以后，消单色像差的谱线还是消色差的两种色光的谱线主要取决于接受器性能，有时也受限于光源及光学材料。应使接受器、光源及光学材料三者性能尽量匹配，也就是使接受器最灵敏的光谱正是光源辐射最强的谱线，也是光学材料透过率最强的谱线。

通常是在光学系统工作的波段范围内，使光学系统对接受器感光最敏感的谱线消单色像差，对这个波段两边缘谱线消色差。

2. 目视光学仪器选择什么样谱线？

目视系统（望远镜、显微镜、相机的取景器等）的接受器是眼睛，在可见光谱中有效波段其边缘光线为 F 光与 C 光之间的光谱区。因此都是对 F 光与 C 光校正色差，对 D 光校正单色像差。但是，人眼最敏感的

波长是 5550\AA ，D 光的波长为 5893\AA ，e 光的波长为 5461\AA ，可见 e 光比 D 光更接近人眼的敏感波长，因此用 e 光校正单色像差更合适。3. 普通照相系统选择什么样谱线？考虑到照相乳剂的光谱灵敏度，普通照相

系统一般对 D 光和 G 光校正色差，对 F 光校正单色像差。

但是，各种照相乳剂的光谱灵敏度差别很大，并且考虑到经常要用滤色片和用目视法来调焦，所以普通照相系统也可对 D 光消单色像差，对 C 光和 F 光消色差。

4. 不用调焦的照相系统选择什么样谱线？

如天文照相系统，考虑到大气的性质和无需调焦的特点，通常是对 G 光校正单色像差，对 h 光和 F 光校正色差。有的光学系统，如红外摄影、紫外摄影等，其应用范围已扩展到可见光范围之外；有的特殊摄影系统，象激光摄影，根本用不着调焦，也用不着用眼睛观察，消色差的要求就成为次要的了。

八、位置色差和倍率色差有什么区别？

位置色差是轴上像差，是由于光学系统对不同色光的折射率不同，因此不同色光的焦距就不同，从而导致不同色光像距不同，即成像位置不同。

倍率色差是垂轴像差，是由于光学系统对各色光的放大率不同而导致它们的像高不同。

两种色差的产生，共同原因是光学系统对不同色光的折射率不同所引起的。

由于两种色差的存在，给实际光学系统的完善成像增加了很大困难，因为即使在近轴区域，这些色差仍然出现。然而更大的困难却是在非近轴区成像时，除了上述两种色差之外，还伴随着球差、慧差、像散、像场弯曲和畸变而出现的所谓的像差的色差。但大多数实际光学材料的折射率随不同颜色而变的量很小，所以尽管这些色差不能同时消除，但在不同情况下，有些色差是可以允许的。

只有完全由反射镜组成的光学系统才没有色差，而在任何折射光学系统中都有色差。为校正色差，须采用组合的光学系统，即借助于组合系统各组元的焦距与其介质的色散参数恰当组合，或组元间隔的合理确定，就可得到消色差光学系统。

第三节 光学系统中一些典型部件的像差情况如何？

摄影镜头是由不同的光学部件按照一定的像差要求组合而成的光学系统。因此，分析一些基本部件的像差情况，对于了解摄影镜头的像差及性能是非常重要的。

一、平面反射镜的像差情况如何？

平面反射镜是摄影系统中的基本部件之一，如亮框取景器中就有平面反射镜。理论上平面反射镜是唯一能成理想像的光学系统。

但由于平面镜加工产生的面形误差，实际上得不到理想的平面。如图 3-13 所示，当平面反射镜起转折光路作用时，平面镜的光轴跟整个光学系统（以一凸透镜表示）的光轴不重合，这样光学系统的轴上点对平面镜而言却是轴外点。当平面镜面形误差很大时，则将产生轴外像差，最显著的是像散差，不存在色差。

二、平行平板的像差情况如何？

平行平板（加在相机上各种滤光镜、高倍显微镜的盖玻璃等）在任何情况下都不产生场曲，当孔径较大时产生球差和慧差，当视场角较大时它将产生像散和畸变。

三、反射球面的像差情况如何？

反射球面是反射系统和折反系统中常用的基本部件之一。图 3-14 所示为物在无限远时的光路图，过入射点 A 的半径 AC 为此点的法线，根据反射定律可求得与无限远物点共轭的像点 F（也是反射镜的焦点），并且 OF 等于球面半径的一半。经过计算得知，反射球面的球差约为同等焦距单薄透镜处于最优良形式（ $s = \frac{1}{2}$ ）时球差的八分之一，如果光阑置于球心，则没有慧差、像散、畸变和色差。

四、场镜的像差情况如何？

1. 什么叫场镜？

什么叫转像系统？

在望远镜和显微镜中常设置转像系统。转像系统的作用在于适应结构布局的需要，使光路偏转一定的角度；把倒立的像转变为正立的像，便于观测；加大筒长，形成一定的潜望高度；可以重新成一次像，加大整个光学系统的放大率。转像系统种类很多，图 3-15(a)所示的转像系统是由透镜组成。

什么叫场镜？

在有转像系统的光学系统中，由于物镜和转像系统之间形成一个中间像，所以轴外光束在转像系统上的入射高度增大，如图 3-15(b)所示。这样，不仅使转像系统的轴外像差增大，同时也增加了转像系统的孔径。

为了克服这个缺点，在中间像的位置设置一个正透镜就可把轴外光线压低，可减小转像系统的口径，如图 3-15 (c) 所示。加在中间像平面位置上或附近的透镜称为场镜，如果没有场镜，光线将按照虚线的方向传播，转像系统必须按虚线尺寸设计。

场镜可用来补偿系统的场曲和畸变。例如若在像面处加负场镜产生的正场曲和正畸变可以补偿整个系统的负场曲和畸变，而不影响其它像差。

五、弯月型厚透镜的像差情况如何？

图 3-16 所示为弯月型厚透镜，其中 r_1 与 r_2 都为负，且 $r_2 > r_1$ ，由厚透镜焦距公式 (2-27(a))：

$$f = \frac{nr_1r_2}{(n-1)[n(r_2-r_1)+(n-1)d]}$$

上式中分子为正，如果分母也为正，则 f 就为正。只有当 d 足够大时，即 $(n-1)d > n(r_2-r_1)$ 时，弯月型厚透镜的焦距为正。在此前提下，随着厚度的不同，它所产生的场曲可正、可负、也可为零。

在各种像差中只有场曲和位置色差是由光学系统的光焦度分布决定的，与透镜的形状无关。但其它像差都跟透镜的形状有关。因此，在校正像差时，首先根据光焦度分配来校正场曲和色差，然后在保持光焦度不变的条件下改变光学系统的结构 (r 、 d) 以校正其它像差。弯月型厚透镜是常用的校正场曲的部件之一。单折射球面的场曲可由下式求得

$$S = J^2 \frac{n' - n}{n'nr}$$

式中 J^2 为常数， r 为折射球面半径， n 与 n' 分别为折射球面物方与像方折射率。弯月型厚透镜的场曲为两个折射球面场曲之和，即

$$\begin{aligned} S &= J^2 \frac{n'_1 - n_1}{r_1 n_1 n'_1} + J^2 \frac{n'_2 - n_2}{r_2 n_2 n'_2} \quad (3-9) \\ &= J^2 \frac{n-1}{n} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \end{aligned}$$

其中 J^2 与 $n-1/n$ ，都为正，当 $r_1 < r_2$ 时，场曲为正； $r_1 > r_2$ 时场曲为负；在 $r_1 = r_2$ 时，场曲为零。而一般的正薄透镜只可能产生正场曲。

如果在厚透镜中加一胶合面，则可同时消色差，但它本身不能消球差和色差。

六、鼓形透镜的像差情况如何？

厚的双凸透镜称为鼓形透镜，它与两块平凸透镜跟一块平行板组成的密接系统等效。这种厚透镜与等效薄透镜像差之差可近似地用平行平板的像差来表示。因此在光学系统的像差校正过程中，把某一薄透镜变成“鼓形透镜”可以得到一定的像差的附加量来补偿整个光学系统的像

差。在一些短焦距、大孔径、大视场的摄影镜头中，采用这种结构对像差的校正是有益的。

七、全对称光学系统的像差如何？

结构参数完全对称于光阑，即以光阑为界分为前后两半部的光学系统称为全对称光学系统。图 3-17 所示的双高斯摄影镜头就是一种常见的全对称系统，图中的光路是 $\beta = -1$ 时的情形。通过计算得知：整个系统轴向像差、球差、像散、场曲和位置色差均为半部的二倍，因为每一半部的相应像差大小和符号都相同；垂轴像差，慧差、畸变和倍率色差对整个系统而言分别都为零，因为每一半部相应的像差都大小相等而符号相反。

图 3-17 中各组元在校正像差中的作用是：中间两个弯月型厚透镜可以校正场曲，厚透镜中加胶合面可校正每半部的位置色差，并使厚薄透镜补偿球差，合适的光阑位置校正像散。

照相镜头多对无限远校正像差，在结构形式上虽保持对称，但具体结构参数（ r 、 d 、 n ）则需适当偏离对称，以补偿 $\beta = -1$ 时所引起的像差。

第四节 初级像差公式如何？

对不同摄影镜头有不同的像差要求，因此它们有不同的光学结构，但是它们都是共轴光学系统，在像差校正中，必须了解各个折射面的各种像差分布。

一、什么叫像差分布？

摄影镜头的像差是通过整个光学系统的光路计算求得，须算出每一个折射面的各种像差的大小和正负。每个折射面的各种像差对相应的该种总像差的“贡献量”叫做这种像差的分布。

每一折射面的每种像差都包括两部分：

折射面本身的像差；

该面之前的所有折射面对这种像差的贡献，但不是前几个折射面产生这种像差的简单相加，而是把前面的这种像差作为物方量，再求出像方量（等于物方量乘以转面倍率或轴向放大率）。光学系统的初级像差是通过对第一近轴光线和第二近轴光线光路计算求得的。

二、什么叫第一近轴光线？

在计算轴上点近轴光线时，孔径角常选取对入瞳边缘的光线，通过轴上物点和入瞳边缘的近轴光线就称为第一近轴光线。可按（2-47）式进行计算，现抄写如下：（参看折射球面光路图）

$$\left\{ \begin{array}{l} i = \frac{S-r}{r} u \\ i' = \frac{n}{n'} i \\ u' = u + i - i' \\ S' = r + r \frac{i'}{u'} \end{array} \right. \quad (2-47)$$

从上式可知：给出物距 S 、折射面曲率半径 r 、入射孔径角 u 、物方和像方折射率，可以求得入射角 i 、折射角 i' 、出射孔径角 u' 及像距 S' 。同时还可看出， i 、 i' 、 u 都可增大或缩小同一倍数，而不影响 S' 值。因此， u 值可以任选，在计算轴上点光线时， u 角常取对光瞳边缘的光线。

对于多个折射球面组成的共轴光学系统，须由前一个面过渡到下一个面，前一面的出射孔径角恰是后一面的入射孔径角即：

$$\begin{aligned} u_1 &= u_2 \\ u_2 &= u_3 \dots \end{aligned}$$

如果以 d_1 、 d_2 ...表示第一折射面与第二个折射面的距离、第二个折射面与第三个折射面间的距离...那么第一个面的像距与第二个面的物距间的关系为：

$$S_2 = S_1 - d_1$$

$$S_3 = S_2 - d_2 \dots$$

前一面的像空间就是下个面的物空间即：

$$n_2 = n_1$$

$$n_3 = n_2 \dots$$

当物在无穷远，即 $S_1 = -\infty$ ，轴上点的光束可以看做跟主轴平行的光束，从图 3-18 可见：

$$i_1 = h_1 / r_1$$

h_1 等于入瞳的半径即 $h_1 = \frac{D}{2}$

为了检验计算结果可用 (2-48) 式校对：

$$h = SU = S_1 u$$

三、什么叫第二近轴光线？

如图 3-19 中的通过物体边缘和入瞳中心的光线，也就是通过物体边缘点的主光线，在近轴区域内时，叫做第二近轴光线。它的计算同样用前边的近轴光路公式、过渡公式及校对公式。为了区别于第一近轴光线，第二近轴光线的光路中所有的物理量都注以下标 z 。从图中可见，入射孔径角与物高和物距间的关系为：

$$u_z = \frac{y}{S_z - S}$$

按式 (2-47) 可计算得 S_z 与 u_z ，再按下式计算理想像高：

$$y' = (S_z - S) u_z$$

S_z 为理想像面的像距，可由第一近轴光线计算出。

四、初级像差公式如何？

通过光路计算得到如下一组初级像差公式：

$$\begin{aligned} \text{球差} \quad L'_K &= -\frac{1}{2n'_k u'_k{}^2} \sum_1^K S_1 \\ \text{慧差} \quad SC'_K &= -\frac{1}{2J} \sum_1^K S \\ \text{像散} \quad X'_{tSK} &= -\frac{1}{n'_k u'_k{}^2} \sum_1^K S \\ \text{场曲} \quad X'_{PK} &= -\frac{1}{2n'_k u'_k{}^2} \sum_1^K S \end{aligned} \quad (3-10)$$

$$\text{畸变} \quad y'_{zK} = -\frac{1}{n'_K u'_K} \sum_1^K S$$

$$\text{位置色差} \quad L'_{FCK} = -\frac{1}{n'_K u'^2_K} \sum_1^K C$$

$$\text{倍率色差} \quad y'_{FCh} = -\frac{1}{n'_K u'_K} \sum_1^K S$$

例如上式中 $\sum_1^K S_1$ 叫做初级球差系数， S_1 叫做初级球差分布系数，依次类推。式中各初级像差分布系数为：

$$S = L u n i (i - i')(i' - u)$$

$$S = L u n i_2 (i - i')(i' - u) = S \frac{i_z}{i}$$

$$S = L u n i_z^2 (i - i')(i' - u) \frac{1}{i} = S \frac{i_z}{i}$$

$$S = J^2 \frac{n' - n}{n' n r}$$

$$S = (S + S) \frac{i_z}{i}$$

$$C = L u n i \frac{dn}{n} \quad (3-11)$$

$$C = L u n i_z \frac{dn}{n} = C \frac{i_z}{i}$$

式中 J 为拉氏不变量，由 (2-6) 式可知：

$$J = n u y = n' u' y'$$

其中 $\frac{dn}{n}$ 为：

$$\frac{dn}{n} = \frac{dn'}{n'} - \frac{dn}{n}$$

dn' 与 dn 可认为是折射面两边介质的色散，如对 F 光与 C 光计算则：

$$dn' = n'_F - n'_C$$

$$dn = n_F - n_C$$

n' 与 n ，用中间波长光线的折射率 n'_D 与 n_D 代替。原则上是只要计算第一和第二两条近轴光线便可由式 (3-10) 和 (3-11)，计算出全部初级像差分布系数及全部初级像差。

第五节 摄影镜头的设计原则是什么？

普通摄影镜头都同时具有较大的孔径和较大的视场，因此无论是与孔径有关的像差还是与视场有关的像差都很大。为了校正像差，在设计摄影镜头时，必须遵循一些原则。这些原则对于摄影者了解摄影镜头的光学结构及其作用是很有益处的。

一、镜片玻璃的选取原则是什么？

1. 为什么设计镜头时，首先要考虑场曲的校正？妨碍摄影镜头视场增大的像差之一是场曲。场曲的大小仅由摄影镜头的光学结构的光焦度分配决定，跟透镜形状关系不大。在保证其光焦度分配一定的前提下，再改变透镜的形状以校正其它的像差时就不会改变系统的场曲。因此在校正像差过程中，首先考虑的应该是场曲。

校正场曲的光学结构常采用弯月型厚透镜与正、负光焦度分离的薄透镜组。

2. 弯月型厚透镜选用什么样玻璃？

从式(3-9)可见，弯月型厚透镜的玻璃应选折射率高一些或色散低一些的，其场曲可小一些，许多厚透镜在像差校正过程中要加胶合面以消色差，这时胶合面两边的玻璃应选择折射率相等而色散不等的相匹配。

3. 消场曲的正、负光焦度分离的薄透镜组采用什么玻璃？

为什么正、负薄透镜结构能校正场曲？

如果薄透镜的场曲也用式(3-9)来计算，并对照图2-10中各种薄透镜的 r_1 与 r_2 的正、负情况，可知只要选择合适的正、负薄透镜相匹配，就可得到校正场曲的光学系统。

校正场曲的条件是什么？

光焦度分离薄透镜系统校正场曲的条件为：

$$\frac{\varphi}{n} = \frac{\varphi_1}{n_1} + \frac{\varphi_2}{n_2} + \frac{\varphi_3}{n_3} \dots = 0 \quad (3-12)$$

式中 φ_1 、 φ_2 等为每一薄透镜的光焦度， n_1 、 n_2 等为每一薄透镜的玻璃折射率。如果系统是由两个薄透镜组成，则消场曲的条件为：

$$\frac{\varphi_1}{n_1} + \frac{\varphi_2}{n_2} = 0$$

其中 n_1 、 n_2 都是正数，只有 φ_1 与 φ_2 异号上式才成立。故只有正、负透镜相匹配时才能校正场曲。当正、负薄透镜的间隔不大，而系统总的光焦度为正，则正薄透镜的光焦度一般大于负透镜的光焦度，欲使上式等于零或者为负值时，最好正透的玻璃折射率高些，而负透镜玻璃折射率低些。

为什么正、负透镜的折射率都高一些对校正高级像差有利？

因为在满足上述校正场曲的前提下，正、负透镜玻璃的折射率都取得高一些，透镜的曲率半径可以增大，因此对减少高级像差有利。通常情况下，是系统中的透镜曲率半径愈大，其像差高级量愈小。当透镜置

于空气中时，其光焦度等于焦距的倒数，即：

$$\varphi = \frac{1}{f'} = \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) (n-1)$$

从上式可知，在保证 φ 一定时， n 值大些， r_1 与 r_2 的值都可大些，故对减小像差高级量有利。

薄透镜系统，在校正场曲的同时也消色差，选什么玻璃？

由分离正、负薄透镜组成的系统，在校正场曲的同时也消色差，必须保证光线在正透镜上的入射高度大于在负透镜上的入射高度（无论正透镜在前或在后），如图 3-20 所示。而且要求正透镜的光焦度大于负透镜的光焦度，同时要使正、负透镜的位置色差互相补偿。为此正透镜可用低色散（高值）玻璃，负透镜可采用高色散（低值）玻璃。例如正透镜宜采用高折射率低色散的 ZK、LaK 等玻璃。负透镜宜采用低折射率高色散的火石玻璃（可对照 3-11 图中 $n_D \sim \nu_D$ 曲线）。

二、什么叫对称和同心原则？

从 (3-11) 式可知，如果一个折射面的第二近轴光线的入射角 i_z 为零时，也就是光阑设在球心处，单色像差只有球差和场曲，其它像差如慧差，像散和畸变都为零。这一特性说明，如果光学系统中，各曲率半径都尽可能弯向孔径光阑时，其轴外像差也应该小得多。系统各面的曲率中心尽可能靠近孔径光阑（即尽可能弯向孔径光阑）的要求称为同心原则，尤其是广角镜头大都符合这一原则。

前边提到过完全对称的光学系统，在 $\beta = -1$ 时，系统的慧差、畸变、倍率色差可自动校正为零。在 β 偏离负一时，上述各垂轴像差也很小。而且在求初始结构时可从求半部的解开始，计算比较简单。满足对称的要求称为对称性原则。许多摄影镜头的基本结构都符合上述两个原则。

三、光学系统复杂化的方法有几种？

1. 为什么要使光学结构复杂化？

虽然光学系统的基本结构大都符合对称和同心原则，但基本结构只提供像差校正的可能性，却不能保证得到满意的像质，特别是对光学性能有较高要求的摄影镜头，为了获得好的像质，就必须在基本结构的基础上加以复杂化。

2. 复杂化的方法有几种？

加胶合面及分裂透镜，是常见的复杂化方法。

四、常见的胶合面有几种？

如图 3-6 所示的胶合透镜组，它们的结构参数：三个折射球面半径 r_1 、 r_2 、 r_3 ；两种玻璃的折射率 n_1 、 n_2 ；它们的平均色散系数即阿贝常数为 ν_1 、 ν_2 等。常见的胶合面有消色差胶合面、消球差胶合面和消像散胶合面。

1. 消色差胶合面

相接触的薄透镜组的光焦度为

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$$

其中 φ 为系统总光焦度， φ_1 与 φ_2 分别为前后两个透镜的光焦度为：

$$\begin{cases} \varphi_1 = (n_1 - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \\ \varphi_2 = (n_2 - 1) \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} \right) \end{cases} \quad (3-13)$$

其中 r_1 为第一个球面曲率半径、 r_2 为胶合面曲率半径、 r_3 第三个球面曲率半径。若消色差还必须满足式(3-5)即：

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{v_1}{v_1 - v_2} \varphi \\ \varphi_2 &= \frac{v_2}{v_1 - v_2} \varphi \end{aligned} \quad (3-5)$$

由式(3-5)可见，在 φ 一定时，只($v_1 - v_2$)很大，即胶合面两边玻璃的平均色散不等，并差较大时， φ_1 与 φ_2 才可较小；从(3-13)式可知，当 $n_1 = n_2$ 时， φ_1 和 φ_2 都较小，则 r_1 和 r_3 可以大些，这样不但能消色差，同时也能减小像差的高级量。

2. 消球差胶合面

当胶合面两边玻璃折射率不相等时，将产生一定球差，这个球差可以补偿整个系统的球差，要求它少产生其它像差，多产生一些球差，这样在平衡系统的球差时，就不会影响其它像差。因此要求胶合面半径符合同心性原则，且所加胶合面位置应尽量靠近孔径光阑。至于球差的正负，只要确定了它的位置和弯曲方向，就可利用 $n_1 > n_2$ 或 $n_1 < n_2$ 来控制。

3. 消像散胶合面

消像散胶合面必须产生一定的像散来校正整个系统的像散，为此胶合面的位置应远离孔径光阑，并使胶合面的弯曲方向背向孔径光阑，也就是有意使胶合面违背同心原则。

五、高斯物镜是怎样复杂化的？

在前边分析完全对称系统的像差时，已介绍了双高斯镜头的情况，它完全符合对称和同心原则。下边分析它是如何从弯月型厚透镜的基础上复杂化的。我们知道，设计摄影镜头时，首先考虑消场曲，我们还知道弯月型厚透镜是能够消场曲(满足一定条件时)的基本部件之一，但它还存在着球差和位置色差，为了校正色差和球差，必须使其进一步复杂化。在双高斯镜头中依靠厚透镜的结构变化来校正场曲 S ，利用薄透镜的弯曲来校正球差 S ，改变两块厚透镜间的距离可校正像散 S ，在厚透镜中引入胶合面可以校正色差 C 。因为它是对称系统，垂轴像差可以自动得到校正。

双高斯物镜的半部系统可以看作是由厚透镜演变来的。一块厚弯月

型透镜，两个球面半径相等。在厚透镜背后加一个由正、负薄透镜组成的无焦系统（它们的总光焦度为零），对整个光焦度的分配和像差分布没有明显的影响。然后把靠近厚透镜的负透镜分离出来，且与厚透镜合为一体，这样就组成了两球面半径不等的厚透镜和一个正光焦度的薄透镜的高斯半部系统，两个对称的半部系统合起来就是双高斯镜头的光学结构。以上过程如图 3-21 所示。

要提高双高斯镜头的光学指标，将受到一对矛盾的限制，即球差与高级像散的矛盾。也就是说，当用薄透镜弯曲使系统的球差及高级量减小的同时，像散和轴外球差却增大了；如果为了校正像散把光阑离开厚透镜，薄透镜向前弯曲，但这样一来球差及其高级量就增加了。解决上述矛盾的方法是：

选用高折射率低色散的玻璃做正透镜，使它的球面半径加大；

用分裂透镜法，即将薄透镜分为两个，使每一个透镜的负担减小，同时使薄透镜的半径加大。这种结构如图 4-11 所示。

在两个半部系统中间引进无光焦度校正板，使它只产生 S 和 S' ，实现拉大中间间隔的效果，如图 3-22 所示。这种结构可使 $2w$ 从 40° 提高到 $50^\circ \sim 60^\circ$ 。

总之，对称型高斯物镜在复印资料时，可以满足 $\beta = -1$ 即物距等于像距，慧差、畸变与倍率色差能得到自动校正。但这种物镜用于普通摄影、放映及放大工作时，物距与像距相差很大即 $|\beta| \ll 1$ ，上述像差不能完全自动校正。消除的方法是一组透镜的形状改变一些，而一组不变。由于形状改变很小，如图 2-66 所示，仍可认为它是对称（亚对称），上述像差仍可得到自动校正。欲进一步提高光学指标，就必须使其进一步复杂化。高斯镜头主要用于广角及制版。高斯型镜头种类很多如“达格”（Dagor）、“普洛塔”（Pratar）、“普拉那”（Planar）。

第四章 镜头里的物理知识

第一节 照相机的概况如何？

一、照相机的工作原理是什么？

图 4-1 所示是照相机工作原理示意图。图中只标出机体、镜头、快门、胶片等主要部分。照相机工作时，镜头将被摄景物（图中的 y ）成像在胶片位置（ $-y$ ）上，通过控制快门的关闭与开启。可使胶片曝光而形成潜影，快门每开闭一次，照相机就完成一次拍照动作。换装胶片或推进胶卷，可以进行第二次拍照。已曝光的胶片经过冲洗、印等光化过程，就可获得负片和正片。当然拍照过程也是光化过程：

景物成像靠镜头；

控制通过镜头光能量的是快门和光圈；

记录影像则靠胶片。

实际照相机的构造是较复杂的。至少得有调焦机构来控制镜头前后移动，能使不同距离的景物成清晰像于胶片位置；得有快门速度的调节装置，来控制（或调节）快门曝光时间的长短以适应被摄体的亮度；胶片曝光后要拉走，未曝光的胶片拉过来，以便准备第二次拍照，因而照相机要具备输片装置；拍照时要观察选取被摄景物的范围，因而要有取景器；计算胶片拍照张数的计数器等。

二、照相机的基本结构有哪些？

国际国内相机型号很多，无论是高档的或中低档的相机都有主体、镜头、取景器、快门、输片机构、计数器、调焦装置、测距器、连闪装置、自拍机等基本结构。

较完善的相机还装有测光系统；135 相机都设有倒片机构；此外相机还有一些附件连接部位，以连接滤色镜遮光罩、三脚架、快门线、闪光灯等附件，以改善拍照效果和扩大照相机使用范围。

三、照相机的规格是怎样划分的？

一般照相机都是以使用胶片尺寸和拍照画幅的大小来划分规格的。如表 4-1 所示为普通照相机规格及画幅尺寸。

四、照相机主要技术性能有哪些？

1. 照相机的类型有几种？

照相机的类型是按照相机的规格和主要结构特点确定的。如 120 双镜头反光照相机；135 基线测距照相机；135 单镜头反光照相机；135 自动曝光照相机；135 自动对焦照相机等等。同一种相机还有拍照不同画幅的区别。如 120 相机就有 $6 \times 6\text{cm}$ 、 $6 \times 4.5\text{cm}$ 、 $6 \times 9\text{cm}$ 、 $6 \times 7\text{cm}$ 等几种不

同规格。

表 4-1 照相机规格及像幅尺寸

| 规格 | | 像幅尺寸 | 备注 | |
|-----|------|----------|---------------------------|------------------------------|
| 大型 | 组合式 | | 8 × 10in 即 18 × 24cm | |
| | | 新闻 | 5 × 7in 即 13 × 18cm | |
| | | | 4 × 5in 即 9 × 12cm | |
| 中型 | 一步成像 | | 8.5 × 10.5cm | |
| | | | 8 × 8cm | |
| | | | 7 × 9cm | |
| | 120 | | | 6 × 9cm 实际 56 × 84mm |
| | | | | 6 × 7cm 实际 56 × 68mm |
| | | | | 6 × 6cm 实际 56 × 56mm |
| | 220 | | | 4.5 × 6cm 实际 41.55 × 56mm |
| | | 127 | | |
| | | | 3 × 4cm | |
| 小型 | 126 | | 26 × 26mm 实际 28 × 28mm | |
| | 135 | | | 24 × 36mm |
| | | | | 24 × 24mm |
| | | 半幅 | 18 × 24mm | |
| 超小型 | 110 | | 13 × 17mm | |
| | 16mm | | | 12 × 17 |
| | | | | 10 × 14mm |
| 9.5 | | 8 × 11mm | | |

2. 镜头的规格指的是什么？

镜头的规格主要指的是焦距、最大相对孔径和视场角等。3. 常见的快门形式和速度有几种？

常见的快门有中心快门、幕帘快门等形式。快门速度一般有 B、1/30、1/10、1/125、1/300 秒等档，也有的快门速段较全，可以从 1 秒 ~ 1/1000 秒以上。

4. 常见的取景和测距方式有几种？

照相机取景和测距方式有多种，但一般最常见的是平视光学取景和双影重合测距。利用反光取景的照相机则靠聚焦屏取景和调焦。

5. 什么是相机的测光范围？

测光范围在照相机上常用规定的 EV 值和胶片感光度来表示，它反映了测光系统能够测量的景物亮度范围。没有测光系统的相机，就没有测光性能，也就谈不上测光范围的问题了。

6. 相机卷片与计数的形式有几种？

常见卷片的形式有：手轮式、搬把式、发条式或小电机作自动输片等。常见的计数形式有：手动计数、自动计数、红窗计数等。

7. 体积和重量为什么也是相机的重要指标之一？

因为现代相机向小型化、轻量化发展，人们在考虑相机其它性能的同时，也关心和重视相机的轻便程度，故重量和体积也作为一项重要指标。

第二节 摄影镜头的概况如何？

一、摄影镜头的基本结构有几部分？

摄影镜头的基本结构有四部分：起成像作用的光学系统；固定光学系统的镜筒；调节光通量的光圈；能使光学系统前后移动的调焦系统。

二、光圈有几种？

光圈一般可分为固定式和可变式两种。固定式光圈只有一个固定的光孔，是最简单的结构形式。可变光圈又可分为：固定光圈和跳动光圈两种。固定光圈调对后在拍摄过程中光孔是不变的，而跳动光圈在拍照开始快门尚未打开的瞬间，光圈孔自动缩到所选择的位置，在快门启闭之后，光圈孔又回到最大位置。跳动光圈常用在单镜头反光照相机上和曝光表控制的自动光圈照相机上。

三、调焦机构有几种？

旋转式调焦机构可旋转镜头，通过罗纹使镜头前后移动。另一种是移动式调焦机构，其中有靠罗纹移动镜头的是调焦机构，由镜筒罗纹及导向钉来控制，135相机多用这种结构；还有靠凸轮来移动镜头的调焦机构，由可转凸轮通过连接板使上、下镜头同时前后移动。

四、镜头的连接方式有几种？

镜头与机身或镜头与快门的连接方式通常有固定式和可卸式两种。固定式连接，镜头与整机成为一个整体，不可随意拆卸。可卸式连接，镜头与整机只是简单的结合，可随时卸下换装其他镜头或附件。

五、镜筒有什么作用？

1. 镜筒有什么作用？

镜筒的主要作用是：固定和支承各光学镜片；保持各镜片轴心重合；同时也保持各镜片间的设计距离；支撑各调节机构；防尘；吸杂光等。

2. 光学镜片在镜筒上固定方法有几种？

镜片在镜筒上固定方法主要有四种：用带螺纹的压圈压紧（多用在向外凸的透镜侧面进行压紧）；对透镜座外端辊进使其包紧镜片（多用在向里凹的侧面进行辊进）；用隔离环将两镜片限定在确定间距上；用弹性钢丝涨圈将镜片卡牢在透镜座上。

3. 镜筒可分几类？

为保证各镜组镜片间的距离精度，镜筒在结构上可分三类：调整型镜筒（有专门调整环）；选配型镜筒（装配时根据检测结果，挑选彼此配合的零件）；互换型镜筒（镜筒上各零件可随意互换）。

镜筒最前端，一般具有安装滤光镜等光学附件结构（多数是螺纹结构），使用时只需将欲用光学附件拧在摄影镜头前端即可；有的镜头前端采用卡口式结构。有的摄影镜头，在镜筒后端安装滤光镜；也有的摄影镜头在镜筒内部安装滤光镜；还有的摄影镜头在镜筒上有安装滤光镜插框缝隙。

复杂的摄影镜头的镜筒一般有主镜筒、前镜筒、后镜筒、外镜筒、联接筒、透镜座、镜头后联接环、外装饰革等部分组成。

六、镜头是怎样分类的？

摄影镜头的种类很多，可从不同角度进行分类。按用途可粗略地分为普通摄影镜头和专用摄影镜头两大类；按焦距改变与否可分为定焦距摄影镜头和变焦镜头；定焦距摄影镜头，在摄影画幅相同的条件下，又可按焦距的长短来分类：长焦镜头、标准镜头、短焦镜头。短焦镜头可包括广角镜头、超广角镜头等。

焦距长短的划分不是绝对的，而是以像角的大小为主要区分依据。画幅不同的标准镜头对应的焦距是不同的。通常将物镜的焦距近似等于胶片画幅对角线长度的镜头，定义为这种相机的标准镜头。比标准镜头焦距小的镜头称为广角物镜；比标准镜头焦距大的称为长焦镜头。各种画幅的标准镜头的焦距如表 4-2 所示。

表 4-2 各种画幅的标准镜头焦距

| 画幅尺寸 (mm) | 画幅对角线 长 (mm) | 标准镜头焦 距 (mm) | 画幅尺寸 (mm) | 画幅对角 线长 (mm) | 标准镜头焦 距 (mm) |
|--------------|-----------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|
| 8 × 11 | 13.6 | 15 | 40 × 65 | 76 | 75 |
| 8 × 14 | 17.2 | 17 ~ 20 | 60 × 60 | 81 | 75 ~ 80 |
| 12 × 17 | 20.8 | 20 ~ 25 | 60 × 90 | 100 | 100 ~ 110 |
| 18 × 24 | 30 | 30 | 90 × 120 | 150 | 150 |
| 24 × 24 | 31 | 35 ~ 40 | 120 × 160 | 200 | 200 |
| 24 × 36 | 45 | 45 ~ 50 | 130 × 180 | 225 | 200 ~ 250 |
| 28 × 40 | 49 | 50 | 100 × 210 | 265 | 250 ~ 300 |
| 40 × 40 | 56.5 | 55 ~ 60 | 180 × 240 | 300 | 300 |
| 45 × 60 | 73 | 75 | 200 ~ 250 | 320 | 320 ~ 350 |

专用摄影镜头的种类很多，如微距摄影镜头、透视调整摄影镜头、柔焦摄影镜头、短筒摄影镜头、自动调焦摄影镜头、医用摄影镜头、显微摄影镜头、内窥摄影镜头、红外与紫外摄影专用镜头、夜视摄影镜头、闪光摄影镜头、变形宽银幕电影摄影镜头、立体电影摄影镜头、高速摄影镜头、水下摄影镜头、鱼眼镜头等。

第三节 标准镜头有什么特点？

标准镜头的光学特性参数，如焦距、相对孔径与视场角跟长焦摄影镜头和短焦摄影镜头比都居中等。相对而言，标准镜头的孔径和视场都比较大，因此轴向与垂轴像差都较大，一个具体的摄影镜头成像质量的高低，关键在于像差的校正程度。下边就几个实例进行粗略地分析。

一、标准镜头的光学结构有多少种？

标准镜头的光学结构类型很多，有简单的，有复杂的，有对称型的，也有非对称型的。

1. 新月式镜头有什么特点？

新月式镜头的光学结构如图 4-2 所示。(a)是摄影镜头发展史上第一个摄影镜头，它的孔径只达 $1/16$ ；图(b)所示是目前在极廉价的一次性相机上用的镜头，如富士一次性相机采用的塑料镜片，其孔径能达 $1/8$ 。

作为一个单透镜，各种像差都客观存在，不能完全消除，只能减小。要成实像必须得用正透镜；要减小场曲根据式(3-9)，弯月型透镜较合适；根据同心性原则，两个曲面都弯向光阑可减小垂轴像差；用配曲法可减小球差。但它对 r_1 与 r_2 的要求跟式(3-9)的要求有矛盾只能折衷；适当的光阑位置有利于减小色差与像散。总之，作为单透镜成像，各种剩余像差都较大，只有降低使用条件：减小孔径和视场以减小相应的像差。

2. 薛瓦利埃镜头有什么特点？

如图 4-3 所示的一组二片式消色差镜头是薛瓦利埃于 1821 年发明的。由于引入了消色差胶合面，比新月式镜头稍有提高，色差校正有提高，但仍属于原始镜头，其孔径最大为 $1:12$ 。

3. 匹兹万镜头有什么特点？

匹兹万物镜是匈牙利数学家 J·M·匹兹万与 1840 年设计的，它是世界上第一个用数学计算方法设计出来的镜头，也是 1910 年以前在照相机上应用最广、孔径最大的摄影镜头。最初的结构形式如图 4-4(a)所示。1878 年以后，后组改为胶合的形式如图 4-4(b)所示。这种镜头的孔径和视场角适应范围分别为： $1:1.8$ ； 16° 以下。

这个物镜系统是由两个分开的正光组构成，系统的光焦度由两组承担，球面半径比较大，这对校正球差有利；但两组分开（两正光焦度分开），场曲却增大了，要校正场曲，则球差与慧差就会增大，这是不能两全其美的。若把前组也改为分离式的，如图 4-5(a)所示，在校正像差方面可稍有提高。但如果像图 4-5(b)所示，在像面附近增加一组负透镜，可使整个系统的场曲得到较好的校正，还可以用这块负透镜的弯曲来平衡整个系统的畸变。但是后工作距太短，只适用于短工作距的条件（像放映物镜等）。

此种物镜各组都分别消色差，整个系统也消色差，近轴部分成像质量优良。由于它结构简单，孔径较大，目前由它改进而得的形式不少于二、三十种之多，视场角一般在 $20^\circ \sim 30^\circ$ ；相对孔径在 $1:3.5 \sim 1:1.5$ 。主要用作电影放映和人像摄影镜头。

4. 柯克镜头（三片式镜头）有什么特点？

柯克物镜（镜头）是三片式薄透镜系统，如图 4-6 所示。它是薄透镜系统中能够校正全部七种初级像差的最简单结构，它所能适应的孔径 $D/f = 1/4.5$ ，视场是 $2w = 50^\circ$ 。

设计镜头的原则是首先考虑场曲的校正，光焦度分离的薄透镜系统，由校正场曲的条件得知，必须是正、负透镜组成的系统。为简单起见，可用对称的观点来分析柯克物镜的像差情况，即把中间的负透镜用一平面分开，组成一个对称系统，每半部系统都是由一个正透镜和一个平凹透镜组成，因此整个系统的垂轴像差（倍率色差、慧差与畸变）可以自动平衡（初级像差）。

每半部系统必须独自校正四种轴向像差，如球差、位置色差、像散与场曲。根据各种像差公式及光焦度公式， $(\phi_1 = (n_1 - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right))$ ， ϕ_2

$= (n_2 - 1) \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right)$ ， $\phi = \phi_1 + \phi_2 - d\phi_1\phi_2$ ，在总光焦度一定的条件，可

以在 n_1, n_2, d, r 不同条件下，分配 ϕ_1 与 ϕ_2 。实际计算表明，负透镜的材料选用色散较大的火石玻璃时，各组透镜的光焦度都较小，有利于像差的校正，但是必须考虑正负透镜的玻璃要相匹配，否则透镜间的距离 d 就要增大，轴外光线在正透镜上入射高度也增大，反而影响了轴外像差的校正，正透镜可以用冕玻璃。

柯克镜头结构简单，初级像差校正得比较好，目前已发展成几十种。它在普及型及低档照相机中仍被广泛地应用着，如国产海鸥 203 型 120 相机，海鸥 4A、4B、4C 型 120 型照相机等的镜头都采用这种结构。但它对像差的校正仍不完善，在剩余像差中以轴外正球差（高级球差）最为严重。

5. 天塞镜头有什么特点？

天塞物镜是由柯克物镜改进而成的，由图 4-7 所示。由于柯克物镜剩余轴外球差严重，将其最后一块正透镜改为双胶合镜组，轴外光线中以上光线（轴外端点通过入瞳上边缘的光线）在胶合面上有最大入射角，可使高级像散和轴外球差减小。天塞物镜能适用的视场比柯克物镜略有增加，光学性能指标为 $D/f = 1/3.5 \sim 1/2.8$ ， $2w = 55^\circ$ 。

由于天塞物镜结构也比较简单，成本也低，所以仍被广泛应用在普及型照相机和放大机上。例如，国产海鸥牌 205 型、东方牌 S4 型，虎丘牌 HQ351 型、牡丹 MD35A 型、海鸥 KJ135 平视旁轴取景照相机摄影物镜。长城牌 PF-1 型 135 单反照相机的摄影物镜，都采用天塞物镜结构。现在类似天塞镜头的设计不少于 30 种。

6. 海利亚镜头有什么特点？

海利亚物镜也是由柯克物镜改进而成的。如果将柯克物镜中两个正透镜都改为胶合透镜组，如图 4-8 所示，就是海利亚物镜。它跟天塞物镜比，进一步改善了轴外光束的成像质量，视场角进一步增大，在航空摄影和人像摄影中应用较多。

7. 松纳镜头有什么特点？

松纳物镜也可以认为是在柯克物镜的基础上发展起来的，它是一种

大孔径小视场的物镜。在柯克物镜的前两块透镜中间引入一块正透镜(或正透镜组)，如图 4-9(a)与(b)所示即为松纳物镜。光束在进入负透镜之前，因引入了厚透镜而使其得到了收敛，故可减轻负透镜的负担，高级球差减小，相对孔径可增大。但是，场曲增大了，垂轴像差校正有困难(因破坏了对称性)。计算结果表明，松纳物镜的轴外像差随视场的增大急剧变大，尤其是色慧差极为严重。因此，它不得不降低使用要求，所适用的视场在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 。

8. 达格镜头有什么特点？

图 4-10 所示的光学结构称为达格镜头，属于正光(能校正七种初级像差的)镜头，是早期应用较广的镜头之一。

我们可用设计镜头的原则，来分析它是如何校正各种初级像差的。整个光学系统的垂轴像差可以自动平衡，因为图 4-10 它是对称型结构。每一半部必须各自校正自己的轴向像差，如场曲、位置色差、球差和像散。首先要校正只由光焦度分布而决定的场曲，每一半部的总体是弯月型厚透镜，根据式(3-9)，式中 n 可取三个透镜的平均值，调整 r_1 与 r_4 使其相等(或接近)可校正场曲；半径为 r_3 的胶合面可校正位置色差(n_2 与 n_3 要相匹配)；半径为 r_2 的胶合面一定是消球差胶合面，因为此种胶合面的半径要符合同心原则，且此胶合面的位置应尽量靠近孔径光阑，在位置和弯曲方向确定以后，利用 n_1 与 n_2 的大小控制该胶合面球差的大小；调整两个半部间的距离(即光阑的位置)来校正像散。

9. 双高斯镜头有什么特点？

双高斯镜头如图 3-21 所示，此种对称型结构其轴向与垂轴像差都校正得较好，孔径很大，视场中等。但结构较复杂，成本高。它被广泛用于高中档相机上以及专业电影摄影机的标准摄影镜头上。例如莱卡 R4 型 135 型相机标准摄影镜头(焦距 50mm，孔径为 1:2)、卡依新 F-1 型 135 照相机的标准镜头(新 FD50mm, $f/1.8$)、海鸥 DF 型、孔雀 DF 型照相机标准镜头(58mm 1:2)、哈色勃莱德 500C/M 型 120 照相机 PLANR120 毫米、1:4 镜头、联邦德国阿里弗莱克斯 C 型 35 毫米电影摄影机的标准镜头(PLANR50 毫米, 1:2)、及和平牌 S-35 型 35 毫米电影机标准摄影镜头(35SJ-50 型 50 毫米、1:2)等。

10. 改进型双高斯镜头有什么特点？

图 3-21 所示的双高斯物镜，有很多优点，但要进一步提高它的光学性能却受到一对矛盾的制约：当半部系统(如后半部)承受无限远光线时，可用薄透镜弯曲校正球差。由于从厚透镜射出的轴上光线近似平行于主轴，薄透镜愈向后弯曲，愈接近平凸透镜，它所产生的球差及高级量就愈小，这只是有利的一面；不利的是轴外光线入射状态变坏，随着透镜的向后弯曲，轴外光线的入射角度大，产生的像散

就大($S \propto \frac{ic}{i}$)。要平衡薄透镜后折射面的像散，需要将光阑尽量靠

近厚透镜使光阑进一步偏离后透镜前表面的球心(即有意让厚透镜前表面违背同心性原则)而使其产生的正向散去平衡薄透镜的像散，如此又使轴外光线在前表面上的入射角急剧增长，则产生的轴外球差及其高级量的增加，真是顾此失彼，不能两全。如图 4-11 所示的复杂化的双

高斯镜头，将薄透镜分成两个，使每一个透镜的负担减小，同时使薄透镜的半径加大，因此这是解决上述矛盾的方法之一，这种结构也应用很广，例如联邦德国阿里弗莱克斯 35BL、4 型 35 毫米电影摄影机的标准镜头（PLANAR50 毫米、 $f/1.3$ ）就是此种结构。和平牌 S-35 型 35 毫米电影摄影机的 35SJ-40（40 毫米、 $1:2$ ）摄影镜头也采用了类似结构。

也有些厂家在复杂化双高斯镜头的基础上继续改进，将第二组透镜（如联邦德国卡尔·蔡司光学公司生产的 PLA-NART50 毫米、 $F1.4$ 和 $F1.8$ 镜头）或第三组透镜分解为两个独立的透镜，从而演变为六组七片式光学结构。采用类似六组七片式结构的有卡侬 FD50 毫米、 $f/1.2$ 与 $f/1.4$ 摄影镜头，潘太克斯 50 毫米、 $f/1.2$ 、 $f/1.4$ 摄影镜头，和平牌 S-35 型电影摄影用长城 35DSJ-50（50 毫米、 $f/1.3$ ）摄影镜头。

还有些厂家在普通四组六片式（图 3-21 所示）双高斯镜头的基础上进行改进：把第二组或第三组分解的两个独立的透镜，从而演变出五组六片式的光学结构，如米诺尔它 50 毫米， $f/1.7MD$ 和 $f/2MD$ 摄影镜头，潘太克斯 M50 毫米 $f/1.7$ 摄影镜头。

在摄影物镜里，高级像差占有特殊的地位。随着孔径或视场的增大，它在像差中所占的比重逐渐增加。因此，要提高摄影镜头的光学性能，即增大孔径与视场角常常受到高级像差的限制。

二、摄影镜头有多少种？

目前摄影镜头种类繁多，无论是国内的还是国外的有的已形成了各自的系列。如卡侬共有 55 种不同焦距和性能的摄影镜头，其中卡侬新 FD 系列镜头就有 52 种（焦距由 15mm 到 800mm，其中包括鱼眼、广角、标准、长焦、折反型、变焦、自动调焦、微距等摄影镜头），焦距为 7.5mm 的新鱼眼摄影镜头，焦距为 500mm 的新折反摄影镜头，TS 型移距摄影镜头（焦距为 35mm）各一种，计 55 种，另外还有三种倍率镜，其中标准镜头有 50mm， $1:1:2$ ， $1:1.4$ ， $1:1.8$ 三种规格，可见，国内外不同厂家生产的摄影镜头种类是很多的。

三、摄影镜头的调焦方式有几种？

1. 什么叫调焦？

在图 4-1 所示的照相机原理图中，当被摄体与照相机位置确定以后，在小范围移动摄影镜头或胶片（曝光窗），或改变焦距（摄影镜头通常是由多个镜片构成，只要改变部分组元间的距离，就可使其焦距改变），以调节物距、像距、焦距，使三者满足高斯公式即可获得清晰像。上述调节过程叫做调焦。

2. 常用的调焦方式有几种？

由于调节过程不同，调焦方式可分三种：曝光窗调焦、整组调焦、部分组元调焦。

什么叫曝光窗调焦？

曝光窗就是装胶片的框（或夹），调节调焦钮时，曝光窗沿主轴方向作前后移动，而被摄体与摄影镜头静止不动，所以曝光窗调焦过程是在物距、焦距一定的前提下，通过改变像距来实现三者满足高斯公式的

过程。

这种调节过程常用于一些大型照相机和转机上。

什么叫整组调焦？

当被摄体与照相机曝光窗位置静止不动时，转动调焦环（或钮）时，镜头的整个光学系统为一个整体沿主轴前后移动，调焦过程中，镜头焦距一定，但物距与像距同时改变来使三者满足高斯公式。这种调焦方式对像差影响小，但结构复杂，体积和重量较大。

整组调焦按镜头（光学结构）运动方式可分为平移和转移两种。平移式调焦在调焦时，摄影镜头的整个光学系统只沿主轴前后平移而不转动，标准镜头大都采用此种调焦方式；转移式调焦在调焦时，光学系统在沿主轴前后移动同时又绕主轴转动（常见于某些早期摄影镜头上）。

什么叫部分组元调焦？

转动调焦环（钮）时，摄影镜头光学系统中，只是部分组元沿主轴方向作前后移动，其它组元静止不动，被摄体与曝光窗也保持不动，但物距、像距、焦距三者同时变化直至满足高斯公式时，像最清晰。

根据联合光具组的焦距公式

$$f = \frac{f_1 f_2}{\Delta}$$

部分组元间的距离 Δ 改变时，它们的联合焦距就发生变化，从而使摄影镜头整个光学系统的总焦距发生变化。

根据联合光具组的主点位置公式可知，当 Δ 改变时其主点（主平面）的位置也改变。因此，虽然被摄物体、曝光窗、光学系统总体位置不动，但因部分组元间距离 Δ 的变化，而导致物距、像距、焦距三者同时变化，直至三者满足高斯公式，调焦过程才完成。部分组元调焦主要应用于变焦摄影镜头及长焦摄影镜头（为内调焦）。因为这两类摄影镜头体积很大，并且很重，不适合整组调焦。

此种调焦方式：调焦机构的结构简单，体积和重量都小；缺点是镜头的像差校正不理想，成像不理想。因为当被摄体，曝光窗位置一定时，像差是光学系统的结构 (r, d, n) 的函数，对某一间距校正了像差，当间距改变时，像差也随之改变，不能同时对各种间距都校正好像差，除非设置补偿机构。

3. 整组调焦时，镜筒的伸出量如何计算？

图 4-12 所示，虚线表示对无限远物体调焦时，摄影镜头光学结构的位置；实线是其对有限远调焦时的位置。

根据空气中高斯公式

$$\frac{1}{S'} - \frac{1}{S} = \frac{1}{f'}$$

当镜头对无限远调焦时， $S = \infty$ ，则 $S' = f'$ ，此时整个光学系统缩至终点位置（系统像方主平面跟曝光窗间的距离等于焦距）；当对有限远调焦时，随着物距的逐渐缩小，像距（ S' ）就逐渐增大，整个光学系统向前伸出量为 x ；对于普通摄影，物距 S 再减小也是 $S > f'$ ，像仍然成在焦平面附近的曝光窗内，即像点的位置不变（还是 P' 点），此时的像距 $S' = x + f'$ ， x 是镜筒伸出量也是镜头焦点前移的量也就是对有限远调焦时的焦物距。

对有限远调焦应用高斯公式

$$\frac{1}{f' + x'} - \frac{1}{S} = \frac{1}{f'}$$

解方程，求得镜筒伸出量 x' 为

$$x' = -\frac{f'^2}{f' + S} \quad (4-1)$$

4. 镜筒伸出量公式如何应用？

我们以几个实例来说明式(4-1)的应用。例一：已知摄影镜头的焦距为 18mm，求自无穷远位置分别调焦至物距为：20，15，10，5，2，1，0.5，0.3 米 (m) 时，镜筒的伸出量 x' 。

解：首先得统一单位，如都变为毫米，当 $S = -20m = -20000mm$ ，则

$$x' = -\frac{18^2}{18 - 20000} = \frac{18^2}{20000 - 18} = 0.0162mm$$

同理可求得相应各物距对应的镜筒伸出量如表(4-3)所示。

例二：某摄影镜头的焦距为 50mm，求自无限远位置分别调焦至 20，15，10，5，2，1，0.5，0.3 (m) 时，镜筒的伸出量 x' 。

计算出的数据如表 4-3 所示。

表 4-3

| 调焦距离 s (m) | 镜筒伸出量 | | |
|----------------|------------|------------|-------------|
| | $f = 18mm$ | $f = 50mm$ | $f = 100mm$ |
| 20m | 0.0162mm | 0.125mm | 0.503mm |
| 15m | 0.0216mm | 0.167mm | 0.67mm |
| 10m | 0.0325mm | 0.251mm | 0.91mm |
| 5m | 0.065mm | 0.505mm | 1.82mm |
| 2m | 0.1635mm | 1.28mm | 5.06mm |
| 1m | 0.33mm | 2.56mm | 10.12mm |
| 0.5m | 0.672mm | 5.12mm | 20.24mm |
| 0.3m | 1.15mm | 8.5mm | 33.75mm |

例三：已知某摄影镜头焦距为 100mm，求自无限远位置分别调焦至物距为 20，15，10，5，2，1，0.5，0.3 米 (m) 时，镜筒伸出量 x' 。

解得数据如表 4-3 所示。

5. 整组调焦有什么规律？

从上述三例的计算结果(表中数据)可见：

当自无限远档调至同一有限物距档时，镜头的焦距愈短，镜筒伸出量愈短；焦距愈长，镜筒伸出量也愈长。焦距一定时，调焦距离愈小，镜筒伸出量愈大。因而为了使摄影镜头轻便，镜头的焦距愈长，其最近调焦距离相对要远。如果超常焦距摄影镜头也采用整组调焦方式，必然笨重，所以纷纷采用内调焦方式。

调焦时镜筒伸出量的大小与物距的移近距离不成比例，因此，摄影镜头环(钮)上的调焦距离标尺的各刻线并不按调焦距离的大小等间

隔排列，而是调焦距离愈远各刻线彼此排列得愈密集，调焦距离愈近刻线彼此排列得愈稀疏。

四、标准镜头有什么优点？

标准镜头跟其它镜头（鱼镜头、广角镜头、长焦镜头、变焦镜头等）比，焦距、视场角等都适中，画幅中各景物间透视关系跟人眼视觉的透视关系很接近，所以看起来觉得画面很逼真。标准镜头像差比同档次其它镜头校正得好，所以成像质量高；其相对孔径相对来说容易制造得较大，所以在低照度下比其它镜头容易拍摄。在单镜头反光照相机中，标准镜头最轻便。

第四节 长焦距摄影镜头有什么特点？

一、什么叫长焦距摄影镜头？

焦距比标准镜头长的摄影镜头，称为长焦距摄影镜头。长焦摄影镜头又分为：焦距比较接近标准镜头的长焦镜头称为普通摄远镜头。例如，在 135 单镜头反光照相机的摄影镜头系列中，一般把焦距自 85mm 至 300mm 的摄影镜头称为普通摄远型镜头；焦距远大于标准镜头称为超摄远镜头。如在上例摄影镜头系列中，焦距自 300mm 至 2000mm 的摄影镜头称为超摄远镜头。也有人将供 135 照相机用的 85mm 至 135mm 焦距的摄影镜头称为中摄远镜头或中焦镜头。

二、长焦距摄影镜头适用于什么条件？

如图 4-13 所示，像高跟焦距的关系为（物在无限远时）：

$$y = -f \operatorname{tg} w$$

像距 $S' = f$ ，当视场角 w 一定时， y 跟 f 的值成正比，欲获得一定高度的清晰像，摄影镜头的焦距必须足够大。也就是说为了适应远距离摄影的需要，镜头焦距较长时，才可使远处物体在像面上有较大的像以满足需要。高空摄影镜头的焦距可达 3m，现在普通相机上也可配有 600mm 的长焦镜头。

尽管标准镜头有那么多优点，但用它拍摄远距离物体获得的像太小，可见不同焦距的镜头只适用于不同的条件。

三、长焦镜头为什么采用摄远型结构？

1. 什么叫摄远型结构？

如图 4-14 所示，由一个正光组和一个负光组（图中用两个薄透镜）组成一个望远镜的物镜，两个光组的间隔 d 较正光组的焦距小（ $d < f_1$ ）。用几何法可求得联合光组的焦点 F 及主点 H 的位置，这种结构令主点前移，导致整个系统的焦距大于筒长即 $f > L$ 。这种望远镜的物镜结构称为摄远型结构。

2. 长焦镜头为什么采用摄远型结构？

因为摄远型结构是正组在前，正负组分离的结构，使主平面推向物空间，筒长小于焦距。长焦镜头采用此种结构可缩短筒长，一般筒长可缩短三分之一左右，不然，其筒长必然很大。在现代大地测量仪器及长焦照相机的摄影镜头中多采用这种光学结构。

四、长焦镜头的像差有什么特点？

底片尺寸一定时，镜头的视场角取决于焦距的长短。设底片的斜对角线的长度为 $2y$ ，则

$$y = -f \operatorname{tg} w = -f \operatorname{tg} w$$

可见焦距愈长，视场角 $2w$ 愈小。长焦镜头的视场角通常只是 $1^\circ \sim 2^\circ$ ，

广角长焦镜头的视场角也不过是 $10^\circ \sim 15^\circ$ 。

正因为长焦镜头的视场小，所以跟视场有关的像差（像散、场曲、畸变、倍率色差）都很小（可忽略不计），故不必考虑这些像差的校正问题。应消除的像差是：跟孔径和视场都有关系的慧差；只与孔径有关的球差、位置色差和二级谱线。特别是球差与二级谱线都随着焦距的增大而成倍数的增大。由像差的特点而决定了长焦镜头的光学结构。

五、常见的长焦镜头光学结构有几种？

因为球差和二级谱线都随长焦镜头焦距的增大而成比例的增大。为了校正二级谱线，摄远物镜常常采用特殊玻璃，甚至是晶体材料。负透镜可用低折射率和低色散（高值）的玻璃或晶体，如特种火石玻璃及氟化钙、氟化钠晶体。

位置色差只与系统的光焦度分配有关，相接触（或间距很小）的正负薄透镜系统消位置色差条件是：

$$\begin{cases} \phi_1 = \frac{v_1}{v_1 - v_2} \phi \\ \phi_2 = \frac{-v_2}{v_1 - v_2} \phi \end{cases}$$

具有一定间隔的两个相接触薄透镜组消色差条件为：

$$\begin{cases} \frac{\phi_1}{v_1} + \frac{\phi_2}{v_2} = 0 \\ \frac{\phi_3}{v_3} + \frac{\phi_4}{v_4} = 0 \end{cases}$$

相接触的双薄透镜系统消二级谱线的条件是：两个透镜材料相对色散 $f \frac{(n_F - n_C)}{(n_F - n_D)}$ 要相同；阿贝常数相差要大。普通玻璃都不能同时满足这两个条件，所以为消除二级谱线，长焦镜头要用特殊玻璃。

薄透镜的光焦度为

$$\phi = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

在满足光焦度分配的前提下，可用透镜的弯曲来校正球差。通过以上这些基本知识的回顾就不难了解下边常见长焦镜头光学结构校正像差的情况。

1. 简单的摄远型镜头光学结构有什么特点？

摄远型镜头都由前后两组构成，前组是正组并承担较大的光焦度，一般它比后组复杂，后组具有负光焦度，整个系统的光焦度为正。

如图 4-15 所示，是常见的比较简单摄远型长焦镜头。前组采用双胶合，或用双分离镜组，并使后负组（胶合或分离）按照同心性原则弯向光阑以利于校正垂轴像差。图 4-15(a)前，后组都是双胶合结构；图 4-15(b)前后组都是双分离结构。

2. 为什么前组用三片或四片透镜可以增大摄远镜头的孔径？

图 4-16(a)光学结构是：前组是二组三片式结构，后组是二片一组式结构。图(b)光学结构是：前组也是三片二组式结构，后组是二片二组结构。

前组采用三片（用一片正或负透镜与一双胶合镜组相匹配）或四片透镜，可以承担较大的相对孔径，减小胶合面的负担。(b)比(a)的色差校正得好。

3. 望远镜头的光学结构有多少种？

望远镜头跟其它镜头一样，种类繁多。由于不同的需要，其孔径、焦距、视场角等都不同，与孔径有关的像差和与视场有关的像差也就不同，因此为校正像差，前组与后组的结构就各不相同。我们仅以几个实例来说明。

例一：潘太克斯超望远镜头的光学结构如图 4-17 所示。此图为潘太克斯 A600mm、1 5.6ED (IF) 型超望远光学结构图。是六组八片式结构，前四片（负、正、正、负）构成了前正组透镜系统，后四片透镜构成了后组（负组）透镜系统，而光圈移至后负组透镜系统的后方。此镜头采用低色散玻璃，使像质有明显改善，采用了内调焦结构有利于减小镜筒的长度。

例二：图 4-18 所示为天塞望远镜头光学结构图。前正组为二片一组结构，后负组为三片一组结构，光阑位于前后组中间。

例三：图 4-19 所示为罗斯望远镜头光学结构图。前组跟天塞望远镜头的前组结构形式相同，后负组是二片一组结构，光阑置于前后组中间。

六、望远镜头的最佳拍摄距离多大？

各种像差都和摄影镜头的光学结构及物体位置和大小有关，只有对一定位置和大小物体成像时，像差才是摄影镜头结构 (r, d, n) 的函数。

在设计不同摄影镜头时，首先选定物体位置和大小，在这个前提下再确定系统的光学结构。校正像差的依据是物距 S ，物高 y ，镜片的半径 r ，镜片的厚度或镜片间的距离 d ，镜片的材料等。既然是对选定的 S 值校正像差，当然在此物距时的像质量是最好的。当 S 变化时，尽管 r 、 d 、 n 不变，像差也要波动的，因此像质也要发生变化。选定的 S 值就是最佳的拍摄距离。

S 值是人为的，所以可以有不同的选择。有些厂家在对望远型、超望远型摄影镜头进行光学设计时，将其最佳拍摄距离设计在 51 倍焦距处；有的厂家将最佳拍摄距离设计在 26 倍焦距处。

如果在最近距离处拍摄，一般都不能获得最佳的像质，尤其是画幅边缘处的像质明显变坏。

尽管长焦镜头通常都采用望远型光学结构、内调焦的方式，但是其体积还是远大于标准镜头的体积（比标准镜头长，也比标准镜头粗）。

第五节 短焦摄影镜头有什么特点？

焦距比标准摄影镜头短，同时又比鱼眼摄影镜头长的摄影镜头，称为短焦摄影镜头。短焦镜头通常又分两类：普通广角摄影镜头（焦距接近标准镜头）；超广角摄影镜头（焦距接近鱼眼镜头）。

例如，在 135 照相机的摄影镜头系列中，通常将焦距自 17mm 至 21mm 的镜头（即视角大于 90° 的非鱼眼镜头），称为超广角摄影镜头，如目前日本尼康公司生产出了焦距 13 毫米、5.6、视角 118° 的超广角摄影镜头；把焦距等于或大于 24mm，而又比标准镜头焦距短的摄影镜头，称为普通广角摄影镜头。

短焦距摄影镜头的最近调焦距离一般比其它镜头近得多，例如可近至 0.25m 至 0.3m 处拍摄。短焦距摄影镜头的最大相对孔径，介于标准镜头与长焦距镜头之间，光圈系数通常为 $f/16$ 。

一、普通广角摄影镜头有什么特点？

1. 普通广角镜头为什么采用反摄远型结构？

普通广角镜头需要在镜头跟底片之间放置分光元件或反光元件，如安装与镜头主轴成 45° 角的反光镜，并保证反光镜工作正常。因此它要求有较长的后工作距（自镜头最后一块透镜的后顶点至镜头像方焦点之间的距离）。

普通镜头的后工作距大都满足不了后工作距“较长”的条件，如双高斯摄影镜头的后工作距通常在 $0.5f' \sim 0.7f'$ 范围内。例如 DF 广角相机镜头要求后工作距为 38.5mm，显然在设计 $f' = 38\text{mm}$ ， $2\theta = 60^\circ$ 的短焦广角镜头时，不能采用双高斯型结构，因为它要求后工作距大于 f' ，而双高斯型结构是后工作距小于焦距。

后工作距大于焦距的光学系统称为反摄远型结构。因为它刚好跟摄远型结构相反：负组在前，正组居后的光学结构。其原理如图 4-20 所示，后工作距 l' 大于焦距 f' 。

2. 反摄远型结构为什么后工作距大于焦距？

如图 4-20 所示为反摄远型结构的广角镜头，由分离的正、负组构成。靠近物空间的光组具有负光焦度，称为前组。靠近像平面的光组具有正光焦度，称为后组。入射光线经过前组发散后，再经过后组会聚于焦平面 F' 。正因为像方主平面位于正组的右侧靠近像平面的空间里，故而反摄远型结构后工作距可以大于焦距（ $l' > f'$ ）。

3. 普通广角镜头的前组与后组都采用什么样结构？

如图 4-21 所示，可见轴外光束（通过轴外边缘点过光阑中心的第二近轴光线）的入射高度跟光阑位置有关，光阑愈远，入射高度愈大。反摄远镜头通常都将光阑设在远离负组的正组中间，轴外光束有较大的入射高度（较大的视场），因此与视场有关的轴外初级像差和高级像差都很大。前组产生的轴外像差力求由本身来校正，剩余量可由后组来补偿，前组与后组的具体结构形式必须满足校正像差的需要。

前组的结构：视场不大时，可采用单片负透镜；视场较大时，前组应采用双胶合或双分离的负光焦度结构，甚至可能用其他更复杂的结

构，如鼓型透镜等。

后组的结构：反摄远镜头的后组承担了较大的孔径，但视场由于前组的发散作用而有所减小。跟一般照相物镜比，仅摄远镜头的后组是对近距离成像的，因为前组的像就是它的物。如图 4-22 所示，由于前组的发散作用使其像点移近镜组，若物点在无限远，像移至 F' 点，若物在有限远 P 点则像移至 P' 点。在物、像关系上，后组更处于对称位置（ -1 ），对后组本身而言，应该采用对称型结构，但是它还承担补偿前组剩余像差的任务，它必须得有些剩余像差：尤其对垂轴像差（慧差、畸变、倍率色差等），前组无论采用前边所说的哪种结构，自己都难以独自消除，其它像差如场曲和位置色差可通过光焦度的分配，光学材料的选择来校正；球差可通过弯曲来校正；像散可通过前后组位置的调整来校正。因此后组常采用不对称的结构（三片式或匹兹万结构等）。

总之，普通广角镜头，由于要求有较大的后工作距，总体不能采用对称型结构。后组要补偿前组的剩余像差，故后组也不能采用对称型结构，这只是一般性的原则。如果前组采用复杂的结构，能独自校正各种像差，后组采用对称型结构也没有什么不行。在后边的实例中可以见到，后组有的采用了对称型结构。

4. 广角镜头的视场边缘照度低，用什么方法提高？根据像面边缘照度 E 与中心照度关系公式（ E_0 为中心照度， ω 为像方视场角）

$$E = E_0 \cos^4 \omega$$

可知，广角镜头的边缘照度，随像方视场角 ω 的增大而急剧降低。尤其在校正像差过程中，为使边缘成像清晰，常有意拦掉一部分轴外光线，这就加重了 E 与 E_0 的悬殊程度（增大了视场边缘的渐晕性）。由上式可知，减小 ω 可增 E （ E_0 一定）。如果保持物方视场角不变，增大前负组光焦度绝对值（ $|\phi_1|$ ），可减小像方视场角 ω ；

如果把光阑移至后正组前焦点 F_2 的位置，如图 4-23 所示。第二近轴光线的出射线必平行于主轴，则 $\omega = 0$ ， $E_1 = E_0$ 。可见，此时整个像面上没有渐晕现象，照度均匀。当然，作为一个具体广角镜头，要在校正像差，增强边缘照度等多方面来权衡。

5. 广角镜头的具体光学结构有多少种？

各种形式的反摄远（广角）镜头，目前世界上已有上百种之多，下边仅举几个实例。

例一：图 4-24 所示为广角镜头光学结构图。从图中得知，前组是一组一片的负透镜，根据前边 3 中的原则可判断它适用于视场不大的条件（当然得比标准镜头视场大点）。前组弯向光阑以减小像差，但它各种剩余像差都会有；后组是复杂的正光组，除了校正本部分各种像差之外，还得平衡前组的剩余像差。

例二：图 4-25 所示的广角镜头，视场角可达 60° ；相对孔径为 1/2.8；这种镜头常用于摄制彩色电影。前负组是两组二片结构；正后组是四组六片对称结构（双高斯型），它可以独自校正七种初级像差，有剩余的高级像散和轴外球差可补偿前组；由后组可补偿的像差判断，前组能校正高级像散和轴外球差之外全部像差（因为它是由正、负透镜匹配的光组）。

例三：图 4-26 为尼柯 24mm 具有调焦补偿元件的广角镜头的光学结构图。

为什么要加调焦补偿元件呢？反摄远镜头，总体都是非对称结构，所以近距离拍摄时摄影镜头的成像性能往往有所降低。例如有的广角镜头在近距离拍摄时，场曲明显增大。如果用调焦补偿元件来平衡近摄时出现的像差以保持成像的清晰度。例如，要拍摄较近距离处的景物而转动调焦环，使整个光学系统向前伸出的过程中，调焦补偿元件将产生附加旋转伸缩运动（有的需单独调节），改变光组间的距离，用其引起的像差，去平衡因物距变化引起的像差。

在图 4-26 中，1 是摄远型镜头的前负组，是三分离的三组三片结构；2 是正后组，是四组六片结构；4 为调焦补偿元件，是二组三片结构。3 所指方向是由无限远向近距离处（0.3m）调焦时整个光学系统的运动方向，4 为向近距离处（0.3m）调焦时调焦补偿光学元件的附加运动（相对运动）方向。

6. 反摄远型结构有哪些应用？

目前单镜头反光照相机，普遍采用反摄远型结构。在普通摄影中，采用反摄远型短焦广角镜头，可获得较大视场的画片和丰富的体视感（立体感）。

由于反摄远型镜头的前组透镜片直径较大，整个镜头的长度和体积都比标准镜头明显增大。

二、超广角摄影镜头有什么特点？

超广角摄影镜头是供非单镜头反光取景照相机使用的短焦距摄影镜头，其对角线视角一般大于 90° 。这种镜头不要求后工作距长，通常都采用对称型结构。常见的有两种类型：

最前端与最后端均为正组透镜；

最前端与最后端均为负组透镜。

超广角镜头是航空摄影中常见的镜头。由于视场大，轴外像差很大，像面照度不均。当视场角等于 120° 时，边缘视场的照度仅是中心视场照度的 6.2%。这样的照度分布，对于底片特别是彩色底片是不允许的。因此，研究轴外像差的校正问题和像面照度的补偿问题，是超广角镜头的关键性的核心问题。下边就几个实例对像差的校正作初步分析。

1. 海普岗超广角镜头的像差校正情况如何？

图 4-27 所示为海普岗镜头的光学结构图，是最早出现的超广角镜头。由于对称性，可使垂轴像差自动得到校正，调整两透镜的间距可以校正像散 S 。在典型部件（对称结构）像差分析中得知：整个对称系统的轴向像差：球差、像散、场曲和位置色差均为半部的 2 倍。在研究高斯物镜时，首先是对每半部校正场曲，位置色差、球差等。但海普岗镜头的每个半部只是一个弯月型透镜，根本无力校正球差、色差。因此这种镜头的孔径指标特别小，可减小跟孔径有关的球差等。

2. 托普岗超广角镜头的像差校正情况如何？

因为只有正、负透镜的联合系统（胶合或分离的）才能校正球差、色差。如果在海普岗结构基础上，加入两块无光焦度透镜组如图 4-28(a)

所示，这样不会影响只跟光焦度分布有关的场曲，然后将正透镜跟弯月型透镜组合起来，负透镜分离出来，就构成了如图 4-28(b) 所示的托普岗超广角镜头。

这种结构使负透镜极度弯曲，且与光阑同心，可以产生大量的正球差，但产生的像散很少。负透镜采用火石玻璃，这样每个半部在总光焦度 ϕ 一定的条件，有：

$$\begin{cases} \phi_1 = \frac{v_1}{v_1 - v_2} \phi \\ \phi_2 = \frac{-v_2}{v_1 - v_2} \phi \end{cases}$$

$\phi > 0$ 时，正透镜用冕玻璃，负透镜用火玻璃，系统可消色差。

负透镜的正球差可以补偿正透镜的负球差。

负透镜产生的像散很小，不影响系统原像散的平衡。

负透镜的场曲可以补偿正透镜的场曲。相对孔径可提高到 $D/f' = 1/6.3$ 。

图 4-29，是托普岗型广角镜头的基本结构型式，目前，在它的基础上改进发展有几十种之多，它也是早期的广角镜头（与图 4-28 结构相同）。

这种镜头的视场角可达 90° ，焦距短，相对孔径为 $1/4.5$ 。缺点是照度不均匀，畸变较大。常用于拍摄狭窄地域中的建筑物、广大场面的新闻摄影、展览大厅中大范围内的展品等。由于广角物镜口径小，所以景深范围大，故适于拍摄景深大的景物。

3. 鲁萨型镜头用什么方法改善像场边缘照度？

鲁萨型镜头为什么采用“负-正-负”型结构？“正-负-正”型的托普岗镜头畸变大，像场边缘照度太小。为了克服这些缺点，进一步校正垂轴像差，尤其是畸变，一律采用如图 4-30(a) 与 (b) 所示的两端是负组，中间是正组的光学结构。这种对称型结构，像方视场角几乎与物方视场角相等，因此这种结构不能像反摄远型结构一样，用增大的方法改善像面照度。

鲁萨型结构如何用像差渐晕现象改善像面照度？

在光学系统中存有两种渐晕：

(a) 几何渐晕：为提高轴外大孔径光束成像质量，有意拦阻一部分光线使轴外成像光束截面积小于视场中心成像光束截面积，因此降低了边缘视场的照度；

(b) 像差渐晕是由光阑慧差产生的。用图 4-31 说明如下：由于前组的光阑慧差，使得交于入瞳边缘点的所有光线（图中画出单箭头和双箭头两条光线），在光阑和出瞳处不再交于一点，而交于两点，这两点的距离称为光阑慧差。在本图条件下，轴外点出瞳面积小于轴上点出瞳面积。但这不是普遍规律。考虑到几何渐晕和像差渐晕两种因素，一个光学系统的照度为：

$$E = E_0 K_1 K_2 \cos^4 \theta$$

式中 E_0 为像面中心照度， K_1 为面渐晕系数（表征几何渐晕性质），它恒小于 1； θ 为像方视场角，在鲁萨型结构中， θ 几乎与物方视场角相等； K_2 为像差渐晕

系数，它可以小于、等于、或大于 1。在反摄远系统中 $K_2 < 1$ ；但在鲁萨型结构中它可以等于一，因为轴上或轴外点入瞳处光束面积相等，则在出瞳处的面积也必然相等。甚至可大于一。如图 4-32 所示，由于入瞳和出瞳面上存在光阑慧差，在入瞳处轴外点的光束孔径 D 大于轴上点光束孔径时，则出瞳处的轴外点光束孔径必大于轴上点光束孔径，则 $K_2 > 1$ 。

在轴外像差校正到允许程度，同时光学系统前、后组光阑慧差必须是对称的前提下，方可用增大 K_2 的方法改善像面照度。

图 4-30 所示的两种镜头，光学性能指标可达 $D/f = 1/8, 2 = 122^\circ$ 。这种超广角镜头为了增大光阑慧差，极度地弯曲了前后组的球壳，虽然照度分布规律由 \cos^4 提高到 \cos^3 。但轴外像差增大了，以至于光阑慧差太大，使轴外宽光束聚焦不好而影响轴外分辨率。

4. 用滤光镜为什么能改善阿维岗超广角镜头的像面照度？

图 4-33 所示的光学结构，就是阿维岗型超广角镜头的结构形式，它是一个四球壳的物镜，有的做成五球壳或六球壳物镜。这种物镜首先考虑的是校正像差，用分离的球壳透镜分担光焦度，轴上和轴外像差校正的都很好。常用它做航测相机的镜头。

在镜头前加滤光镜可以改善像面照度，是因为滤光镜上镀有不均匀的透光膜，中心透光率只是边缘透光率的 50%。使阿维岗整个像面照度分布是：从中心到 $\theta = 45^\circ$ 的视场内的照度为 $E = E_0 \cos^2 \theta$ ； 45° 视场以外的照度为 $E = E_0 \cos^3 \theta$ 。

综上所述可见，所有超广角镜头的光学结构都符合“对称”和“同心”原则，可使整个系统的初级垂轴像差自动平衡；为了校正轴向像差，必须正负透镜组合；为了提高光学性能必须使系统进一步复杂化，如阿维岗镜头两端的负组是由两个（或更多）球壳构成，中间的正组是具有两个胶合面的鼓型结构。因为航测镜头对物像间的几何相似要求特别严格，对场曲和畸变的校正程度要高。实际像差的校正程度也是相对的，所说托普岗型镜头的畸变大，对航测来说是太大，对拍摄一般景物而言就不算大，因为它必定是对称型结构，有能力使初级畸变校正至零。

第六节 非球面在摄影镜头中有哪些应用？

一、常见的非球面有哪些？

最简单的二次圆锥面（非球面）有抛物面、椭球面、柱面等。

随着光学仪器的发展，对其性能和质量要求愈来愈高：如何提高摄影镜头的相对孔径，扩大视场角，改善照度，简化结构以及提高像质等实际需要促进了非球面的应用。

二、非球面在摄影镜头中有哪些应用？

近年来非球面的应用日益增多。在成像质量不高的镜头中、普通摄影镜头中、广角镜头中、大孔径镜头中以及变焦镜头中都有应用。

在镜头中引入非球面有利于校正除场曲之外的各种像差。在光阑附近设置非球面，可校正各带高级球差；在像面附近或远离光阑处设置非球面可校正像散和畸变等。

例一：如图 4-34 所示为引入非球面的鲁萨尔 38 型航测镜头的光学结构图。

没引入非球面的鲁萨尔镜头的光学性能指标为： $D/f = 1/8$ 、 $2\theta = 122^\circ$ ，轴外点照度用增大光阑慧差法由 $E = E_0 \cos^4$ 提高到 $E = E_0 \cos^3$ ，并影响了轴外的分辨率。

引入非球面后的鲁萨尔摄影镜头，前组的非球面为高阶非球面，相应的光学指标都有提高，而且像场边缘的照度改善得更好，由 $E = E_0 \cos^4$ 提高至 $E = E_0 \cos^2$ ；光学指标为： $f = 36\text{mm}$ ，相对孔径 $f/7.7$ ；视场角 $2\theta = 148^\circ$ ，不影响轴外分辨率。

例二：在反摄远型短焦广角镜头中引进非球面，简化了结构。原结构为九片，如图 4-35(a)所示；使用非球面简化后的结构为七片，如图 4-35(b)所示。原相对孔径为 $f/18$ ，简化后的相对孔径为 $f/2$ 。适用于 35mm 电影摄影用的短焦广角镜头， $f = 25\text{mm}$ ，在光阑附近采用非球面，可以校正与孔径有关的高级像差（高级球差与高级慧差）。使用非球面以后的结构在口径上与长度上都可缩小 $1/3$ 左右。

例三：图 4-36 所示为引入非球面的短焦广角电影摄影镜头的光学结构图，非球面控制了像散与畸变。

例四：图 4-37 所示是相对孔径为 $f/0.519$ 的大孔径摄影镜头的光学结构，因为引入了非球面，使结构简化到只用五个透镜的少组元的系统。

如果不采用非球面，这样大的相对孔径，球差与慧差及其高级量都是很大的，相应的结构自然要复杂得多。

第七节 鱼眼镜头有什么特点？

一、什么是鱼眼镜头？

鱼眼镜头也叫全景镜头，它也是短焦距超广角镜头，只是比普通超广角镜头焦距更短，视场角更大。鱼眼镜头的视场角等于或大于 180° ，有的可达 230° 。在 135 照相机系列中，鱼眼摄影镜头的焦距范围一般为 6mm 至 16mm。

图 4-38 是尼柯 8mm 鱼眼镜头的光学结构图。是 8 组 10 片式结构， $2 = 180^\circ$ ，调焦范围是 $0.3\text{m} \sim \infty$ ，光圈调节范围为 $f/2.8 \sim f/22$ 。前一、二、三组都是凹透镜，第四组是弯月型凸透镜，第四组之后为滤光镜，之后为第五组凸透镜，再之后便是双胶合透镜组六和七，最后就是第八组凸透镜，该镜头体积比较大（直径为 123mm，全长 139mm）。该镜头装有五片内置滤光镜。

图 4-39 所示为联邦德国卡尔·蔡司公司生产的迪司它冈 16mm，1 2.8 鱼眼摄影镜头光学结构图。七组八片式结构：第一片与第二片都是负透镜，后组由五组六片共同构成一个正光组，在光阑附近设有内置滤光镜（有四片供你任选）。视角为 180° ，调焦范围为 0.3m 至 ∞ ，光圈调节范围为 $f/2.8 \sim f/2.2$ ，体积为 $70\text{mm} \times 61.5\text{mm}$ 。

二、鱼眼镜头跟广角镜头的区别是什么？

广角镜头跟鱼眼镜头即有相似之处，又有区别。共同点是：焦距较短，视场较大。因此，像差很大，尤其是跟视场有关的像差最甚；像场照度非常不均匀。因此，校正大像差和改善像场照度是所有大视场镜头共同要解决的主要问题。当然它们还有许多不同之处。

视场角大的程度不同，焦距短的程度也不同。

适用条件不同，也就是用途不同。象托普冈型广角镜头，主要用于拍摄狭窄地域中的高建筑物、广大场面的新闻摄影、展览大厅中大范围内的展品等。虽然这种镜头畸变比较大，但是，对于普通人眼，没经过专门训练，对于畸变不超过 5% 左右的图像是感觉不出它的几何失真的。所以像拍摄新闻片、电视片、电影片等摄影镜头和观察用的望远镜等。只要畸变不超过 5% 是不妨碍使用的。但作为航测摄影镜头，如阿维岗型镜头，对畸变必须严格校正。

鱼眼镜头适用于拍摄圆形的景物，如圆形剧场、广场的全景、天空等。所以鱼眼镜头的畸变不予校正，而是保留，拍摄的画面显得高大、宽广、辽阔，这种变形是有益处的。

三、鱼眼镜头的成像原理是什么？

1. 为什么叫鱼眼镜头？

鱼眼摄影镜头前端第一片透镜的前表面向前鼓出，第一片透镜的前顶点超过镜筒，好像鼓起的金鱼眼。

由光的折射规律可知，光线在传播过程中，在两种媒质界面处要折

射，当光由光疏介质到光密介质时，如图 4-40(a)所示，由空气到水，则折射角 i' 必小于入射角 i 。因此，当光线掠入射 ($i = 90^\circ$) 时，折射光线也必定折向水中，如果水中有鱼，折射光线可达到鱼眼中，也就是说水中鱼可以看到空气中 180° 范围内的物体，即水中鱼在空气中视场角 $2\theta = 180^\circ$ 。鱼眼镜头有跟鱼眼相似的形状又有与鱼眼相似的作用，故而得名。

2. 鱼眼镜头的成像原理是什么？

如图 4-38 与 4-39 所示的鱼眼镜头光学结构可知，前组相当于一个弯曲很大的负光组，利用分散的光焦度镜组分担光焦度，一方面能使大视场内的光线进入后组，这样结构对校正像差有利；后组无论是由分离与胶合透镜组成，还是由半圆透镜与胶合透镜等组成，都起一个正光组的作用：成像；校正除畸变之外的像差；靠近光阑的滤光镜则可以改善像场的照度。图 4-40(b)所示为前组用一片凹透镜表示，后组用一个正光组表示的成像原理图。

四、鱼眼镜头怎样分类？

鱼眼镜头按设计原理可分为三种类型：等距投影型、正投影型和立体角投影型三种类型。目前市场中出售的鱼眼镜头绝大多数属于等距投影型。鱼眼镜头按其画面形状又分为：(a)圆形鱼眼镜头，它所拍出的像画面在底片上呈圆形，在这种情况下，对角线视场角、水平视场角、垂直视场角三者相等；(b)对角线鱼眼镜头，它所拍出的像画面呈矩形，在这种情况下，对角线视场角、水平视场角、垂直视场角三者不等。

鱼眼摄影镜头按有无调焦环可分为普通调焦型和预调焦型两种。调焦型鱼眼镜头用调焦环，可以调焦；预调焦型鱼眼镜头，在出厂之前已预先将镜头调焦至某距离处（如 0.5m）并固定死，故镜头上无调焦环，也不能调焦。这种鱼眼镜头大都是早期产品，焦距很短、景深很大，只要拍摄距离不小于出厂前固定的那个调焦距离，通常是不会影响拍摄效果的。

新型鱼眼镜头，如尼柯 6mm, 1:2.8, $2\theta = 220^\circ$ 与 8mm, 1:2.8, $2\theta = 180^\circ$ ，在安到单镜头反光照相机上之后，仍然能通过摄影镜头和反光镜、屋脊五棱镜进行直接取景和进行测光，并且摄影时具有自动收缩光圈功能。旧式鱼眼镜头，如尼柯 6mm, 1:5.6, $2\theta = 220^\circ$ ；10mm, 1:5.6, $2\theta = 180^\circ$ ，在往照相机上安装时，因镜头后端伸入机身的部分长，几乎贴近曝光窗处，故在安装前应把单镜头反光照相机的反光镜先升起并锁住，故这类镜头无法进行单镜头反光取景，验证调焦，甚至有的也不能进行测光，如此只能用旁轴取景器辅助取景构图（一般也只能对 160° 范围内的景物取景）。

鱼眼镜头是专用镜头之一。

第八节 近距摄影有什么特点？

一、什么叫近距摄影？

在普通照相机上外加特殊附件，对 1 米以内细小物体进行拍摄称为近距拍摄。近距摄影的横向放大率 值在 $1/5 \sim 1$ 之间。

1. 用普通相机进行近摄时为什么必须外加特殊附件？根据理想光具组成像基本公式：

$$\frac{1}{S'} - \frac{1}{S} = \frac{1}{f'} \quad \beta = \frac{S'}{S}$$

当摄影镜头焦距 f' 一定时，物距 S 愈小，像距 S' 愈大， β 也愈大，即底片上物体像愈大。欲拍摄物体细节，需要对物体进行拍摄，特别是拍摄细小物体，有时要近至 10cm 以内。在这种情况下，普通整组调焦照相机（或其它形式调焦的普通相机），在其调焦限度内根本无力在底片上获得清晰像，因为满足高斯公式的像成在底片的后面。

普通相机，由于结构的限制，被摄物体距镜头的距离，最近也得 1m 左右。要拍摄距离小于一米的物体，还要获得清晰像，用不加特殊附件的普通相机是根本办不到的。除非在被摄体位置和镜头焦距一定的情况下，想办法拉长曝光窗与镜头间的距离；或者保持被摄体与曝光窗的位置一定，想办法改变镜头的焦距。上述两种办法都必须在普通相机上外加特殊的附件。

2. 什么叫附加镜法？

保持被摄的近物位置和普通相机的位置一定，在相机镜头前加一附加镜，这时附加镜跟相机镜头组成一个联合

光具组，它相当一个新镜头，其焦距 $f' = -\frac{f'_{\text{附}} f'_{\text{镜}}}{\Delta}$ ， $f'_{\text{附}}$ 为附加镜的焦

距， $f'_{\text{镜}}$ 为相机镜头的焦距， Δ 为附加镜的后焦点与照相镜头的前焦点的距离。经过调焦使物距、像距、焦距 f' 满足高斯公式，在相机曝光窗上的底片上可获得近物的清晰像。如图 4-41 示意图，(a) 为未加附加镜作近距拍摄时，像点 P' 远离了镜头成像的焦平面；图 4-41(b) 为加近摄镜后，拍摄相同位置的物体，像能成在焦平面（曝光窗）上。可见在底片与镜头间距离不变的前提下，加附加镜后能拍摄比未加附加镜头近得多的物体。

加近摄镜法可适用于任何类型的照相机，但是这种方法有一些不足之处。我们知道，在被摄物体位置和大小确定的条件下，光学系统的像差是其结构 (r, d, n) 的函数，加近摄镜后，系统的结构有变化，因此其像差也要发生变化。原来镜头的像差已平衡，加附加镜后，这种平衡被打破，出现了球差和色差，故成像清晰度降低。由于附加镜的种类规格有限，不能作高倍近摄，倍率的变化也作不到连续。

3. 什么叫加长像距法？

在镜头和相机的暗箱之间，加近摄圈或皮腔，使镜头能更长的伸出以加大像距，一般皮腔的长度可在 30 至 200mm 内伸缩。小于 30mm 的近摄，可采用近摄圈。皮腔加在标准镜头上，能获得 $1 \times \sim 3 \times$ 的照片。

加长焦距法的优点是这种方法不改变相机镜头的光学结构，故相机镜头的变化不大，因此跟附加镜法相比像的清晰度高，放大倍率可用皮腔的伸缩来连续变化。但这种方法有一定的局限性，它只适用于镜头能从暗箱上卸下的相机。

二、怎样计算附加镜的光焦度？

1. 怎样计算附加镜的光焦度？

空气中的透镜（或镜组）的光焦度等于其焦距的倒数即， $\phi = \frac{1}{f'}$ ，附加镜实际是凸透镜，如焦距与光焦度分别以 $f'_{\text{附}}$ 、 $\phi_{\text{附}}$ 表示，则：

$$\phi_{\text{附}} = \frac{1}{f'_{\text{附}}}$$

附加镜与眼镜片一样，通常用光焦度标注，市场上出售的附加镜通常有：+1D、+2D、+3D 三种。+1D 附加镜的焦距为 1m、+2D 附加镜焦距为 0.5m、+3D 附加镜焦距为 0.33m。

2. 怎样计算附加镜组的光焦度？

由第三章联合光具组有关公式：

$$\Delta = d - f'_1 - f'_2$$

$$f' = -\frac{f'_1 \cdot f'_2}{\Delta} = \frac{f'_1 \cdot f'_2}{f'_1 + f'_2 - d}$$

若两个透镜相接触即 $d = 0$ ，则

$$f' = \frac{f'_1 \cdot f'_2}{f'_1 + f'_2}, \quad \phi_1 = \frac{1}{f'_1}, \quad \phi_2 = \frac{1}{f'_2}$$

$$\phi = \phi_1 + \phi_2$$

例如当三种规格附加镜联合使用时（密接），其总光焦度为+6D。

3. 怎样计算附加镜与物镜组合的焦距？

这就是求 $f'_{\text{附}}$ 与 $f'_{\text{镜}}$ 的联合光组的焦距公式：

$$f'_{\text{组}} = \frac{f'_{\text{附}} \cdot f'_{\text{镜}}}{f'_{\text{附}} + f'_{\text{镜}}} \quad (4-3)$$

使用几个附加镜的组合焦距，以毫米为单位，而 $\phi_{\text{附组}}$ 以米为单位则

$$f'_{\text{附}} = \frac{1000}{\phi'_{\text{附组}}} \text{毫米}$$

4. 怎样计算加附加镜近摄时放大率？

照相物镜对焦在无限远时，放大倍率按下式计算：

$$\beta = \frac{f'_{\text{物镜}}}{f'_{\text{附}}} \quad (4-4)$$

表 4-4 为附加镜近摄时放大率（物镜对焦在无限远）

表 4-4

| 镜头焦距(mm) | 加附加镜后的放大倍率 | | |
|----------|------------|------|------|
| | +1D | +2D | +3D |
| 50 | 0.05 | 0.1 | 0.15 |
| 75 | 0.075 | 0.15 | 0.22 |
| 100 | 0.1 | 0.2 | 0.3 |
| 135 | 0.135 | 0.28 | 0.42 |
| 200 | 0.2 | 0.4 | 0.6 |
| 300 | 0.3 | 0.6 | 0.9 |

5. 怎样计算实际拍摄距离？

由式(4-3)， $f'_{\text{组}} = \frac{f'_{\text{附}} \times f'_{\text{镜}}}{f'_{\text{附}} + f'_{\text{镜}}}$ ，分子、分母都除以 $f'_{\text{附}}$ ，则：

$$f'_{\text{组}} = \frac{f'_{\text{镜}}}{\phi_{\text{附}} f'_{\text{镜}} + 1} \quad (4-5)$$

加上附加镜后最远的拍摄距离，是以原镜头对焦在无限远时为准，原镜头对无限远调焦其像距等于镜头焦距 $f'_{\text{镜}}$ 。所谓“为准”，就是加附加镜后联合光组对有限远物体拍摄时，其像距 S' 也等于 $f'_{\text{镜}}$ ，即 $S' = f'_{\text{镜}}$ ，这时的物距就是加附加镜后的最远拍摄距离，它刚好等于附加镜的焦距。推导过程如下：

$$\text{已知：} f'_{\text{组}} = \frac{f'_{\text{镜}}}{\phi_{\text{附}} f'_{\text{镜}} + 1}, S' = f'_{\text{镜}}$$

求： $S = ?$ （最远拍摄距离）

解：根据高斯公式 $\frac{1}{S'} - \frac{1}{S} = \frac{1}{f'}$

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{S'} - \frac{1}{f'}$$

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{f'_{\text{镜}}} - \frac{\phi_{\text{附}} f'_{\text{镜}} + 1}{f'_{\text{镜}}}$$

$$= -\phi_{\text{附}} = -\frac{1}{f'_{\text{附}}} = \frac{1}{f'_{\text{附}}}$$

$$S = f_{\text{附}} = \frac{1}{\phi_{\text{附}}}$$

使用两个附加镜时

$$S = \frac{1}{\phi_{\text{附}1} + \phi_{\text{附}2}}$$

若相机物镜对焦在有限远距离 m 时，加附加镜后的实际拍摄距离为

$$S = \frac{f'_{\text{附}} \cdot m}{f'_{\text{附}} + m} \quad (4-7)$$

或

$$S = \frac{m}{\phi_{\text{附}} m + 1} \quad (4-8)$$

一般市场上出售的附加镜，都有详细的拍摄距离（即物距），见表 4-5。由表可见物镜对焦时，实际拍摄距离可按式（4-7）或（4-8）计算出。例如 m 取 15 米， $f_{\text{附}}$ 取 100 厘米时，可算得 $S = 94$ 厘米与表相符。

表 4-5 拍摄距离表

| 物镜对焦距离 | 实际拍摄距离（米） | | |
|--------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | +1D $f_{\text{附}} = 100\text{cm}$ | +2D $f_{\text{附}} = 50\text{cm}$ | +3D $f_{\text{附}} = 33\text{cm}$ |
| | 100 | 50 | 33 |
| 15 | 94 | 48.5 | 32.5 |
| 7.5 | 88 | 47 | 32 |
| 4.5 | 82 | 45 | 31 |
| 3.0 | 75 | 43 | 30 |
| 2.0 | 67 | 40 | 28 |
| 1.5 | 60 | 37 | 27 |
| 1.25 | 54 | 35 | 26 |
| 1 | 50 | 33 | 25 |
| 0.90 | 48 | 32 | 24 |
| 0.80 | 42 | 31 | 23.5 |
| 0.60 | 38 | 27 | 22 |
| 0.50 | 33 | 25 | 20 |

三、怎样计算加附加镜后光组的光圈数？

根据光圈数 F 的定义式 $F = \frac{f'}{D}$ ，可知，当摄影镜头孔径 D 一定时，其光圈数与焦距成正比。设原物镜的焦距为 $f_{\text{镜}}$ ，光圈数为 $F_{\text{镜}}$ ；加附加镜后光组的光圈数为 $F_{\text{组}}$ ，焦距为 $f'_{\text{组}}$ ，则：

$$\frac{F_{\text{组}}}{F_{\text{镜}}} = \frac{f'_{\text{组}}}{f'_{\text{镜}}} \quad (4-9)$$

$$F_{\text{组}} = F_{\text{镜}} \frac{f'_{\text{组}}}{f'_{\text{镜}}}$$

四、怎样计算近距摄影的景深？

根据式（2-87）抄写如下

$$\begin{cases} \Delta_2 = \frac{FZP^2}{f'^2 + FZP} \\ \Delta_1 = \frac{FZP^2}{f'^2 - FZP} \end{cases}$$

对于近距摄影，F 为加附加镜后光组的光圈数（如 4-9 式所示）；Z 为底片弥散斑直径：直接印片时取 0.1mm，放大用底片取 0.033mm；P 为近摄时的实际拍摄距离；f' 为附加镜与镜头联合光组的焦距。总景深 = $\Delta_1 + \Delta_2$ ，经进一步推导得（其中 β 为物像间横向放大率）：

$$\Delta = 2F_{\text{组合}} Z(\beta + 1) / \beta^2 \quad (4 - 10)$$

近摄景深表就是按式（4-10）计算的，如表（4-6）与（4-7）所示。

表 4-6 弥散斑直径为 0.033mm 时景深表

| 放大倍率 | 光圈数 F | | | | | | | | | |
|-------|-------|------|-----|------|------|-----|-----|------|-----|-----|
| | 1.5 | 2 | 2.8 | 4 | 5.6 | 8 | 11 | 16 | 22 | 32 |
| 0.1 | 10 | 14 | 20 | 29 | 41 | 58 | 80 | 116 | 160 | 231 |
| 0.11 | 9 | 12 | 17 | 24 | 33 | 48 | 65 | 95 | 131 | 190 |
| 0.125 | 8 | 10 | 13 | 19 | 27 | 38 | 52 | 76 | 105 | 152 |
| 0.143 | 5 | 7 | 10 | 15 | 21 | 30 | 41 | 59 | 81 | 118 |
| 0.167 | 4 | 6 | 8 | 11 | 16 | 20 | 30 | 44 | 61 | 88 |
| 0.2 | 3 | 4 | 6 | 8 | 11 | 16 | 22 | 32 | 44 | 64 |
| 0.25 | 2 | 3 | 4 | 5 | 7 | 10 | 14 | 21 | 29 | 41 |
| 0.33 | 1.2 | 1.6 | 2.2 | 3.2 | 4.4 | 6 | 9 | 13 | 18 | 26 |
| 0.5 | 0.6 | 0.8 | 1.1 | 1.6 | 2.2 | 3.2 | 4 | 6 | 9 | 12 |
| 0.667 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 1.0 | 1.2 | 2.0 | 2.4 | 4 | 5 | 8 |
| 1.0 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1.2 | 1.6 | 2.4 | 3.2 | 4.8 |
| 1.5 | 0.11 | 0.15 | 0.2 | 0.31 | 0.41 | 0.6 | 0.8 | 0.12 | 1.6 | 2.1 |

(续)

| | | | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| 2.0 | 0.08 | 0.10 | 0.14 | 0.20 | 0.28 | 0.41 | 0.5 | 0.8 | 1.2 | 1.6 |
| 3.0 | 0.04 | 0.05 | 0.07 | 0.10 | 0.16 | 0.23 | 0.32 | 0.47 | 0.6 | 1.0 |
| 4.0 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.08 | 0.11 | 0.15 | 0.23 | 0.34 | 0.46 | 0.68 |
| 5.0 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.07 | 0.09 | 0.13 | 0.17 | 0.26 | 0.34 | 0.52 |
| 6.0 | 0.017 | 0.02 | 0.03 | 0.05 | 0.06 | 0.09 | 0.12 | 0.18 | 0.25 | 0.36 |
| 7.0 | 0.015 | 0.019 | 0.027 | 0.038 | 0.05 | 0.08 | 0.11 | 0.15 | 0.21 | 0.31 |
| 8.0 | 0.01 | 0.019 | 0.024 | 0.034 | 0.047 | 0.067 | 0.09 | 0.13 | 0.18 | 0.27 |
| 9.0 | 0.01 | | 0.020 | 0.029 | 0.04 | 0.058 | 0.08 | 0.11 | 0.16 | 0.23 |
| 1.0 | 0.01 | 0.01 | 0.018 | 0.026 | 0.037 | 0.053 | 0.07 | 0.10 | 0.15 | 0.21 |

表 4-7 弥散斑直径为 0.1mm 时景深表

| 放大倍率 | 光圈数 F | | | | | | | | | |
|-------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 1.5 | 2 | 2.8 | 4 | 5.6 | 8 | 11 | 16 | 22 | 32 |
| 0.1 | 33 | 44 | 62 | 88 | 123 | 176 | 242 | 352 | 484 | 704 |
| 0.11 | 27 | 36 | 50 | 72 | 101 | 144 | 198 | 288 | 396 | 576 |
| 0.125 | 22 | 29 | 40 | 58 | 81 | 115 | 158 | 230 | 317 | 461 |
| 0.143 | 16 | 22 | 31 | 45 | 63 | 90 | 123 | 179 | 246 | 358 |
| 0.167 | 14 | 17 | 24 | 34 | 47 | 67 | 92 | 134 | 185 | 269 |
| 0.2 | 9 | 12 | 17 | 24 | 34 | 48 | 66 | 96 | 132 | 192 |
| 0.25 | 6 | 8 | 11 | 16 | 22 | 32 | 44 | 64 | 88 | 128 |
| 0.33 | 4 | 5 | 7 | 10 | 13 | 19 | 26 | 38 | 53 | 77 |
| 0.5 | 1.5 | 2.4 | 3.4 | 5 | 7 | 10 | 13 | 19 | 26 | 38 |
| 0.667 | 1.1 | 1.5 | 2 | 3 | 4 | 6 | 8 | 12 | 16 | 24 |
| 1 | 0.6 | 0.8 | 1.1 | 1.6 | 2.2 | 3.2 | 4.4 | 6 | 9 | 13 |
| 1.5 | 0.3 | 0.4 | 0.6 | 0.9 | 1.2 | 1.8 | 2.4 | 3.6 | 5 | 7 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2.0 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1.2 | 1.7 | 2.4 | 3.4 | 4.8 |
| 3 | 0.14 | 0.18 | 0.24 | 0.35 | 0.5 | 0.7 | 1.0 | 1.5 | 1.9 | 3 |
| 4 | 0.09 | 0.12 | 0.17 | 0.25 | 0.30 | 0.5 | 0.7 | 1.0 | 1.4 | 2 |
| 5 | 0.08 | 0.10 | 0.13 | 0.19 | 0.26 | 0.38 | 0.53 | 0.76 | 1.1 | 1.5 |
| 6 | 0.06 | 0.08 | 0.11 | 0.15 | 0.21 | 0.30 | 0.42 | 0.61 | 0.84 | 1.2 |
| 7 | 0.05 | 0.06 | 0.09 | 0.13 | 0.18 | 0.26 | 0.35 | 0.51 | 0.74 | 1.0 |
| 8 | 0.04 | 0.06 | 0.08 | 0.11 | 0.16 | 0.22 | 0.31 | 0.45 | 0.62 | 0.9 |
| 9 | 0.04 | 0.05 | 0.09 | 0.10 | 0.14 | 0.19 | 0.26 | 0.38 | 0.53 | 0.72 |
| 10 | 0.03 | 0.04 | 0.06 | 0.09 | 0.12 | 0.18 | 0.24 | 0.35 | 0.48 | 0.70 |

五、近摄时其它量怎样计算？

1. 近摄时焦深怎样计算？

为了与景深相区别以 Δ' 表示焦深如式 (2-85) 所示，抄写如下：

$$2\Delta' = 2Z'F(1-\beta)$$

经过变形，并且将 Z 以焦距的分数形式表示，近摄时焦深为

$$\Delta' = \frac{f_{\text{组合}} F_{\text{组合}} P}{100(P - f_{\text{组合}})} \quad (4-11)$$

2. 加附加镜近摄时视场范围怎样计算？

如果以 W 表示物空间的高度或宽度，N 表示底片的高度或宽度，则视场范围可按下式计算：

照相物镜调焦在无限远时：

$$W = \frac{Nf_{\text{附}}}{f_{\text{镜}}} \quad (4-12)$$

照相物镜调焦在有限距离 m 时

$$W = \frac{N}{f_{\text{镜}} \left(\phi_{\text{附}} + \frac{1}{m} \right)} \quad (4-13)$$

3. 怎样计算近摄时的曝光倍数 K?

因为近摄时，像面的面积增大，在加长像距法近摄过程中，摄影镜头的聚光本领没增大，因此近摄时必然导致曝光量不足。在光圈数 F 一定时，必须增加曝光时间，规律如下：

$$K = (m + 1)^2 \quad (4-14)$$

近摄时的曝光时间，在 F 一定时是正常曝光的 K 倍。 为放大倍率。

第九节 微距摄影有什么特点？

一、什么叫微距摄影？分几类？

微距摄影是被拍摄物体距摄影镜头的距离比近距摄影时还近，像与物的放大倍率比近摄时还要大。微距摄影方法可分两种：一是用专门的微距镜头；二是用普通镜头外加特殊附件。

二、微距摄影镜头可分几种？

微距摄影镜头常见的有如下几种：

1. 标准微距摄影镜头，它是按焦距为 45 ~ 60 毫米的标准镜头设计的，不需要加其它附件，拍摄近距离物体可得到放大倍率等于一的像。

2. 远摄微距摄影镜头，其焦距比标准微距镜头的焦距长。适合于拍摄昆虫、小动物及展览会的展品等。因拍摄距离长，可不干扰被摄体（像昆虫）。配合闪光灯也很方便。但在通常情况下只能得到缩小的像，这种镜头加上附件后其放大率为 $\times 2$ 。

3. 微距变焦镜头，其变焦范围由广角至长焦，适应性广。可随意改变构图，能有效地控制活动中的目标在画面中的位置，适合拍运动物体。但这种镜头体积大而且重，畸变大，尤其长焦距时最明显。在短焦距时最短拍摄距离不如定焦微距镜头近。

三、微距摄影附件有哪些？

常见的微距摄影附件如下：

1. 近摄皮腔，可与一般镜头配合进行微距摄影，但只能在近距离中对焦，不能对焦在无限远。

2. 短座镜头，它只能与指定的近摄皮腔配合使用，能连续对焦至无限远，常用的焦距范围在 100 ~ 135mm。

3. 近摄环，功能与近摄皮腔相似，都用以改变像距，但它不能连续改变放大率。近摄环一套有 3 ~ 5 个，环的薄厚不等，可单独使用，也可组合使用（可任意组合）。

4. 增距镜，在保持最近拍摄距离的条件下，在微距镜后面加上增距镜可组成联合光组，根据式(2-36)(b)， $f = \frac{f_1 f_2}{\Delta}$ ，其组合光组的焦距

$f_{\text{组}} = \frac{f_{\text{镜}} f_{\text{增}}}{\Delta}$ 。在微距镜焦距一定，微距镜的后焦点与增距镜的前焦点之间的距离一定时，组合光具组的焦距与增距镜的焦距 $f_{\text{增}}$ 成正比。故用增距镜可改变镜头（联合光组）的焦距以获得较大的影像。例如一只 1:1，焦距 50mm 的微距镜加上一只 2 倍的增距镜便等于一只焦距为 100mm 的微距镜，能拍得 2:1 的照片，放大率增加一倍，可见增距镜能增加联合光组的焦距。但镜头的像质不如原镜头的，使用时应尽可能缩小光圈。

四、怎样计算带附件的微距摄影镜头的各种参数？

原理与各种参数的计算方法跟近距摄影相同。

五、微距摄影镜头跟带附件的微距摄影镜头有何不同？

微距摄影镜头大都具有微距摄影功能和普通摄影功能。微距摄影镜头不需要安装特殊附件，就能在非常近的距离处拍摄微小物体或物体细微局部的特写画面。微距摄影镜头是专门拍摄微小物体和翻拍等近距离摄影为目的而设计和校正像差的。因而在近距离摄影时，其像场非常平，分辨率高，畸变小，影像对比度高，色彩还原好。总之，微距摄影镜头在近距摄影时有良好的成像能力。例如，定焦距微距摄影镜头，其最佳像质一般设计在 为 0.1 的调焦距离处。此外，微距摄影镜头的成像质量在整个调焦范围内变化不大，所以可以进行普通摄影，可以由微距状态迅速调至普通摄影状态。

带附件的摄影镜头，是由普通摄影镜头与特殊附件（近摄皮腔、近摄环）构成。普通摄影镜头主要供拍自无限远至较近调焦距离处的景物用，所以普通摄影镜头是以中等距离和远距离摄影为目的而设计和校正像差的。因此，用普通摄影镜头安装近摄附件后在极近距离处拍摄，像差明显增大，成像质量显著下降。特别是大孔径镜头在近摄时，其画幅边缘的影像清晰度降低，即使缩小光圈也无明显改善。

普通镜头在正常情况下可拍摄远处景物，却不能直接拍摄近物，加上附件后才能近摄，但不能立即拍摄远处景物。

从上述微距镜头与加附件的微距镜头的特点中，可以看出它们的区别。

六、微距摄影镜头在结构形式上有几种？

微距摄影镜头在结构形式上可分为两种：

1. 具有内置伸缩筒的微距摄影镜头。在普通摄影时，只需转动调焦环就可进行正常调焦；在进行微距摄影时，只须将转到最近调焦距离处的调焦环继续转动，就可使整个光学系统随同内置伸缩筒一起迅速前进，使像距显著增大。

2. 改变摄影镜头内的部分光学透镜组的前后位置，来实现微距摄影，并可获得较高影像放大率。

七、怎样计算微距摄影的总放大率？

一般微距摄影得到的负片，放大倍率都比较小，不便观看。如需用幻灯投射在屏幕上或将负片再次放大成一幅图片资料时，被摄物体影像放大率可根据式 (2-24(b)) 求得，即联合光具组的放大率等于各部分光组的放大率之积。上述情况相当于微距摄影镜头与幻灯机镜头或放大机镜头的联合光具组，故其放大率为：

$$= \beta_1 \beta_2 \quad (4-15)$$

式中 β 为影像总放大率； β_1 为微距摄影时的放大率； β_2 为幻灯投影或负片再次放大的倍率。

第十节 显微摄影有什么特点？

把显微镜和照相机适当结合，用来拍摄微小物体，叫做显微摄影。显微摄影时可用带镜头的照相机，也可用不带镜头的照相机，后者使用的更为普遍。显微摄影比微距摄影具有更大的物像放大比，一般由几十倍到上千倍。我们首先从显微镜说起。

一、显微镜有什么用途？

显微镜是用来观察微小物体和认识微观世界的重要手段和工具；也是进行光学精密测量、分析微观组织、观察微观结构进行科学实验和开展微观工艺等必需的科学仪器和技术设备。

为了不断改善光学性能和使用功能，绝大多数显微镜，几乎都做成在同一个仪器本体上，配备可以更换的显微物镜和目镜，用不同的物镜和目镜互相交替配套，即可组成一系列放大倍率和技术性能不同的光学系统，从而可组成多倍率、多功能、性能齐全和使用方便的完善仪器。

为了满足某种特殊的光学性能或技术性能，通常在物镜的前方或后方加入某些特殊光学组件或某种中间成像系统，可构成光学性能优异、仪器结构精密、特性好、效能高的专用显微镜。如偏光显微镜、干湿显微镜、作为记录分析用显微照相和电视显示显微镜等。

二、显微镜的成像原理是什么？

1. 显微镜的成像原理是什么？

简单显微镜就是一块凸透镜（放大镜）。当放大镜靠近眼前时，被观察的小物体必须放在它的焦点之内并靠近焦点处；如果物体离放大镜较远，像就成在放大镜和眼睛之后；若物距太小，像就成在明视距离之内，这时虽能看到像，但眼睛太吃力；所以只有像成在无穷远到明视距离之间时，才与眼睛的调节范围相适应。物体放在放大镜焦点之内附近或焦点上，这时物体 Y 对光心的张角近似等于 Y' 对光心的张角，如放大镜光路图 4-42 所示。

2. 简单显微镜的放大本领等于什么？

因为眼睛靠近放大镜，所以物与像对瞳孔的张角可用它们对透镜光心的张角来代替，再根据式 (2-83(a))，如图 4-42 所示各量，放大本领（视放大率）为：

$$M = \frac{\text{tg}\omega'}{\text{tg}\omega} = \frac{250}{S} \quad (4-15)$$

视放大率即通过放大镜看物体时，其像对瞳孔的张角的正切，与直接看

明视距离处的物体对眼的张角正切之比。 $\text{tg}\omega' = \frac{y'}{-S'} = \frac{y}{-S}$ ， $\text{tg}\omega = \frac{y}{-250}$ ，

由高斯公式中解出 S （取绝对值）代入 (4-15) 式则简单显微镜放大本领为：

$$M = \frac{250}{f'} + \frac{250}{S'} \quad (4-16)$$

若物在焦点上 ($|S| = f', S' = \infty$)，则：

$$M = \frac{250}{f'} ; \quad (4-17)$$

若像在明视距离处 ($S' = -250\text{mm}$) 则：

$$M = 1 + \frac{250}{f'} \quad (4-18)$$

以上两式是确定放大镜 (和目镜) 放大本领的方便公式。从公式中可知，放大镜的焦距短一些，但放大本领很大。

3. 复合显微镜的成像原理是什么？

复合显微镜的光学系统是由物镜和目镜构成，它们都是复杂的光学系统。为了简单，图中都以一个透镜表示。如图 4-13 所示，被研究物体 Y 置于物镜前一倍焦距与二倍焦距之间，其像 y_1 成在目镜前焦点内附近处，通过目镜观察到的是 y_1 的像 y_2 ， y_2 一般位于出射光瞳前明视距离 (250mm) 或无限远处。通常说的显微镜指的就是这种显微镜。

4. 复合显微镜的放大本领等于什么？

由式 (2-36(a)) 可知复合显微镜焦距为：

$$f' = \frac{f'_物 f'_目}{\Delta} = \frac{f'_物 f'_目}{l} \quad (4-19)$$

式中 $f'_物$ 为物镜像方焦距， $f_{|l}$ 为目镜物方焦距 $f_{|l} = -f'_{|l}$ ， $\Delta = F物 F'_{|l} \approx l$ ，因为目镜与物镜的焦距都很小，所以 Δ 也叫做光学长筒，近似等于两镜间距。如果把复合显微镜总体看为一个焦距为 f' 的放大镜则式 (4-17) 为

$$M = \frac{250}{f'} = -\frac{1250}{f'_物 f'_目} = \left(-\frac{1}{f'_物}\right) \left(\frac{250}{f'_目}\right) \quad (4-20)$$

因为物体在物镜前焦点之外附近处，所以 $-f'$ 可看作是物距， l 可近似看作是物镜的像距，故 $-l/f'_物$ 可看作是物镜的放大率； $\frac{250}{f'_目}$ 为目镜

的视放大率。因此复合显微镜的放大本领或放大率都是由上述两部分组成。显微镜的物镜和目镜上分别刻有“10×”、“20×”等字样，以便由两者的乘积得知其放大倍数。

三、显微镜物镜有什么特性？

由于显微镜主要是用来观察或测量近处的微小物体的，所以如何把物体放得足够大，并且分辨清楚细节，这是显微镜的主要任务。

1. 显微镜的物方视场等于什么？

设物方视场为 $2y$ ，像方视场为 $2y'$ 则

$$2y = \frac{2y'}{\beta} \quad (4-21)$$

式中像方视场被镜筒直径所限制是个定值。所以高倍显微镜物镜的视场很小，一般情况下，物镜的物方视场是不专门给出的。为物镜的放大率，即式(4-20)中前边因子(取绝对值)则：

$$\beta = \frac{1}{f'_{物}} = \frac{160}{f'_{物}}$$

我国规定显微镜机械筒长 l 为 160mm。

2. 显微镜的分辨率等于什么？

由式(2-79)显微镜的分辨极限为

$$\Delta y = 0.610 \frac{\lambda}{n \sin u} \quad (4-22)$$

式中 λ 为观测时所用光线的波长， $n \sin u$ 为物镜数值孔径。可见显微镜对于一定波长的光线的分辨率，在像差校正良好时，完全由物镜的数值孔径所决定，数值孔径愈大，分辨率愈高。3. 显微物镜像面中心部分照度等于什么？由式(2-68(b))可知显微物镜像场中心照度跟数值孔径的平方成正比，即：

$$E' \text{an}^2 \sin^2 u' = (n' \sin u')^2 \quad (4-23)$$

4. 显微镜的景深等于什么？

由导出的显微镜景深公式得知：显微镜的放大率愈高、数值孔径愈大，景深愈小(实际显微镜的景深是很小的)。

四、显微物镜的基本类型有几种？

显微物镜根据它们校正像差的情况不同，通常分为消色差物镜，复消色差物镜和平视场物镜三大类。

1. 消色差物镜，这是应用最广的一种显微物镜。为了提高分辨率，它的数值孔径很大(由式(4-22)可知)，因此与孔径有关的像差(球差、慧差、位置色差)都很显著，必须校正；但由于它视场很小，故对轴外像差不做重点考虑，也能满足一般的使用要求。消色差物镜又可分为：低倍物镜、中倍物镜、高倍物镜、浸润物镜等。

2. 复消色差物镜，这种显微物镜主要用于研究用显微镜及显微照相中，它要求严格校正轴上点的色差、球差和慧差，同时要求校正二级谱线。倍率色差并不能完全校正，一般须用目镜补偿。为了校正二级谱线，常选用萤石做为部分透镜的材料，这种物镜结构很复杂，如图4-44所示。图中带阴影的透镜是用萤石制造的。

3. 平视场物镜，这种物镜主要用于显微照相和显微摄影，它要求严格地校正像面弯曲。对于平视场消色差显微物镜，其倍率色差不大，不必用特殊目镜补偿。而平视场复消色差物镜，则必须用目镜来补偿它的倍率色差。这种物镜的结构非常复杂。物镜中场曲的校正，通常采用几个弯月形厚透镜来实现的。图4-45所示放大率为 $40\times$ ，数值孔径为 0.85 的平视场复消色差显微物镜结构。图中带阴影的透镜是用萤石制成的。

五、目镜有几种？

目前常用的望远镜和显微镜的目镜有惠更斯目镜、冉斯登目镜、凯涅尔目镜、对称目镜、无畸变目镜、广角目镜等。

1. 什么叫投影目镜和摄影目镜？

投影目镜和摄影目镜指显微投影和显微摄影所用的目镜，此类目镜因为物距较长，倍率不大，其出瞳较大，对像面弯曲和像散要求较高，常用对称式目镜和补偿式目镜。

2. 什么叫对称式目镜

图 4-46(b)所示为对称式目镜光学结构图，它是应用非常广泛的中等视场目镜。它由两个双胶合镜组构成。为了加工方便，这两个镜组采用相同的结构。对称式目镜要求各镜组自行校正色差，因此倍率色差也随之而校正。同时它还能校正慧差和像散，由于这种目镜结构紧凑，因此场曲更小。对于由有一定间隔的两个薄透镜组构成的光学系统，其光焦度如式(2-4(b))：

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - d\varphi_1\varphi_2$$

以前讨论一般摄影物镜设计原则，其中要满足对校正场曲有利，其条件为 $\sum \varphi/n$ ，等于零。对于目镜也一样，如果 $\frac{1}{n_1} = \frac{1}{n_2} = 0.7$ ，则两薄

透镜系统产生的场曲决定于：

$$\sum \frac{\varphi}{n} = \frac{\varphi_1}{n_1} + \frac{\varphi_2}{n_2} = 0.7(\varphi_1 + \varphi_2) = 0.7(\varphi + d\varphi_1\varphi_2)$$

其中 φ_1 、 φ_2 分别是两透镜组的光焦度； d 为两透镜组的间隔。此式表明：当 φ_1 与 φ_2 都为正光焦度时，其场曲随间隔 d 的增大而增大；当 φ_1 和 φ_2 为异号光焦度时，其场曲随间隔的增大而减小。由以上的讨论可知对称式目镜的结构对场曲的校正是比较有利的。因为它的两块负透镜在目镜的外侧，相距较大的间隔，而它的两块正透镜在目镜的内侧，彼此非常靠近。所以对称式目镜是产生场曲较小的结构形式。

但是双胶合透镜的胶合面半径比较小，该面上产生的高级像差比较大，这就限制了这种目镜的视场。

对称式目镜的镜目距比较长，它的光学特系为 $2^\circ = 40^\circ \sim 42^\circ$ ；出瞳相对孔径为 1:1.3。

3. 什么叫补偿式目镜？

补偿式目镜光学结构如图 4-46(a)所示，这种目镜球差和色差、场曲及像散等像差校正的较好，成像质量高，视场角为 $30^\circ \sim 35^\circ$ ，相对孔径可达 1:10 左右，作为中低倍目镜性能良好。

总之，物镜所成的放大影像只有经过目镜再次放大成像才能获得显微放大的效果。目镜的成像条件、像差情况和技术要求都必须同物镜匹配，根据显微系统成像特点，如高倍率、高分辨率、小视场角等，则对显微目镜也相应的要求有小孔径、小视场角、高倍率和高分辨率的光学特性。

六、显微摄影的成像原理是什么？

1. 不带摄影镜头的显微摄影成像原理是什么？由图 4-43 所示的显微镜光路图可知，目镜成的像是放大的正立（对中间像而言）虚像，虚像眼睛可以观察到，但屏幕或胶片是接收不到的。因此，如果将显微镜的光学系统完全保留，用摄影机皮腔跟显微镜的目镜联接，调节目镜与物镜间的距离，令物镜的像成于目镜物方一倍焦距与二倍焦距间，此中间像被目镜再进一步放大，在屏幕上形成一实像，如图 4-47(a)、(b)所示。如果屏幕为一毛玻璃，即可取景对焦，然后换上底片即可进行拍摄。如果屏幕是白布或白墙，就是显微投影，可供多人同时观看。这时系统的放大率等于物镜的放大率和目镜的放大率之积：

$$= \text{物} \cdot \text{目}$$

这种情况应用得比较普遍。

2. 显微摄影的其它方案有几种？

用显微镜作摄影系统的物镜。底片放在物镜所成像的平面上，这种方法简单，像质不好。根据式(4-20)，其放大率没有后边部分即（绝对值）：

$$\beta = \frac{1}{f_{\text{物}}} = \frac{160}{f_{\text{物}}}$$

显微镜的非标准使用。例如令目标远离物镜才能在感光层中得到像，这时不需调节目镜与物间的距离，因为目标远离物镜，故物镜成的中间像在目镜物方焦点之外，再经目镜可成放大的实像。

显微镜的光学系统完全保留，显微镜与照像机耦合，即显微物镜成的中间像通过显微目镜和照相机物镜（从目镜出射的平行光）成像于照相机物镜后焦点附近。由式(4-20)可知，将 1 代以 160mm，明视距离 250mm 以相机物镜焦距代替，则在此种情况下，其放大率为

$$\beta = \frac{160}{f_{\text{显物}}} \cdot \frac{f_{\text{照相物镜}}}{f_{\text{目}}}$$

这种耦合方法，原理简单，但系统中的剩余像差增大。

七、怎样实现显微摄影中的正确曝光？

以不带照相机镜头的显微摄影为例加以说明。曝光是显微摄影中的重要环节，曝光正确与否决定着照片的质量。影响显微摄影曝光的因素很多，如底片的性能、照明光源的强度和色温、照明方法、滤光片种类、物镜的孔径和倍数、摄影皮腔的伸长量、被摄标本的颜色和光学性质等。因此难以用计算方法求得正确的曝光时间，通常用试摄法测定。具体步骤是：测定时先用毛玻璃对焦，观察毛玻璃面上的亮度，粗估一个曝光时间；装上有底片的暗盒，关闭照明灯，将暗盒抽开，开灯曝光 1 秒；关灯，遮盖 1/5 的暗盒，再开灯使余下 4/5 干板继续曝光一秒钟（总共 2 秒）；关灯，再关上 1/5 暗盒，再开灯二秒（总共 4 秒）；关灯，再关上 1/5 暗盒，再开灯曝光四秒（共 8 秒）；关灯，关上 1/5 暗盒，再开灯将最后 1/5 面积底片曝光 8 秒（共 16 秒）曝光完毕立即冲洗，冲

洗后从深浅不同的条纹中选取反差最适当的，就是在该摄影条件下的正确曝光时间。一般试摄测定时，曝光时间多依几何级数增加，即 1, 2, 4, 8, 16, 32.....

第十一节 变焦镜头有什么特点？

一、变焦镜头的变焦原理是什么？

1. 什么是变焦镜头？

现代的变焦摄影镜头的焦距可以在它本身限定的最短和最大焦距之间任意调整（连续改变），因此，一个变焦镜头可顶多个定焦距镜头用。通过镜筒上变焦环的推拉左右旋转可改变焦距，其效果从取景器可以观察到，画面的景物由远拉近（由局部变为全景），之所以能观察到上述情形，是因为在变焦过程中引起视角变化所致。

不同焦距范围的变焦镜头，对于改变景物的大小、虚实及透视关系将产生不同的影响。当变为长焦望远镜头时，适于拍摄体育项目或野生动物；变为中等焦距时相当于标准镜头；变为短焦距时则相当于广角镜头，可以增大视场角，能概括较宽的影像，如卧室，大的组合家俱和家庭成员都能同时进入画面；有的变焦镜头还有微距摄影装置，不用加任何附件，就可供特写用。

2. 变焦镜头的变焦原理是什么？

由式(2-40)(a)即 $f' = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - d}$ 可知，由两个透镜组成的联合光具

组的焦距 f' 与两个透镜的焦距 f_1 与 f_2 及两个透镜的主平面间距 d 有关，一个变焦摄影镜头是由多个透镜构成。因此，变焦镜头的焦距 f' 是由其中单个透镜的焦距 $f_1, f_2 \dots f_m$ 和透镜主平面间的距离 $d_1, d_2 \dots d_m$ 所决定的。要想使总焦距 f' 变化，就要让 $f_1, f_2 \dots, d_1, d_2 \dots$ 这些量发生变化。在现代技术条件下，要让单个透镜的焦距按一定规律连续变化是难以实现的。因此，只有使 $d_1, d_2 \dots$ 中某几个发生连续变化，就能实现总焦距 f' 的连续变化。

3. 变焦镜头的发展过程如何？

人们对变焦镜头的一般原理，在几十年前就研究过了，只是因为变焦镜头在设计和制造上存在着当时还不能解决的科学和技术上的问题。

近四十多年来，由于电子计算机在光学设计上的应用，光学多层介质膜用于增透光的技术的成功及精密机械加工的进步等，才使变焦镜头的生产得以实现。目前已有多种性能良好的变焦镜头，广泛用于电视与电影摄像、望远摄影（如人造卫星）和显微摄影等技术领域，及导弹实验、追迹观察、火箭记录等方面。变焦镜头为适应不同的实际要求可分为不同的类型（包括望远摄影镜头和显微摄影镜头）。摄影镜头由各种定焦摄影镜头扩展到变焦距，是近四十多年来光学上的一个重要成就，也是在模拟人眼方面的一个进步，它显示着现代光学的发展趋势。

对于定焦距摄影镜头，要获得在像面上不同放大率的像，根据 $\beta = -\frac{f}{x}$ ，可知必须改变被摄体到镜头的距离，这是一般摄影都遵守的原则。但有时这个原则是难以实现的，如拍摄野生动物活动情况，记录

一场球赛和军事演习等。

早些时候常采用折衷的办法，即一个照相机（或摄像机），不断更换不同焦距的镜头来解决不同放大率像的拍摄，但在换镜头的过程中很可能漏拍精彩的画面，何况定焦距镜头也只有有数的几种，远远满足不了摄影实践的需要。变焦距摄影镜头正是在摄影实践的需要中产生和发展的。

二、变焦距镜头主要构造有几部分？

变焦镜头是通过改变透镜组之间间隔改变整个镜头焦距的。在移动透镜组改变焦距时，像面的位置总要有所移动。因此对像面移动必须加以补偿，否则胶片上将得不到清晰的像。补偿的方法主要有机械补偿法和光学补偿法。

1. 机械补偿变焦镜头主要结构如何？

图 4-48(a)与(b)所示的示意图：透镜 1 称为前固定组，2 称为变倍组，3 称为补偿组，1、2、3 三组构成变焦镜头的“变焦部分”；4 称为后固定组。图中变倍组 2 由左向右作线性移动时，焦距由短变长，同时像面也发生移动，用补偿组 3 作相应的少量非线性移动，以达到光学系统既变倍而像面位置又稳定的效果。2 与 3 的位置必须是一一对应的，因而两个透镜组的移动必须用一组复杂的凸轮机构来控制。

2. 机械补偿可分几种？

机械补偿可分为正组补偿变焦镜头和负组补偿变焦镜头两种。机械补偿变焦镜头的变倍组通常都是负透镜组。补偿组有取正透镜组的，如图 4-48(a)所示，叫做正组补偿变焦镜头；补偿组也有取负透镜组的变焦镜头，称为负组补偿变焦镜头，如图 4-48(b)所示。

3. 什么叫物像交换原则？

无论是正组补偿还是负组补偿，都可分为物像交换原则或非物像交换原则两类。前者应用得最多。当变焦镜头焦距改变时，同时要求像面不动，利用“物像交换原则”可以满足上述要求。

如图 4-49 所示，P 是物点，P' 是像点，物像间的共轭距离为 D，O 为一凸透镜，用实验（或理论）可以证明，当 O 沿 PP' 移动到两个特定位置时，位于 P' 处的光屏可分别接收到缩小与放大的实像（在 $d = \sqrt{D(D-4f)}$ 时），而且两种情况下成像放大率互为倒数。如果物与像的位置互换上述规律仍然成立。如果 O 是负透镜，上述关系也依然成立。变焦镜头中的变倍组透镜的两个共轭点（物点与像点）都是实点或都是虚点，则总可以找到透镜的两个不同位置，其共轭距离（物点到像点）的距离彼此相等，而垂轴放大率互为倒数。这种物像关系称为物像交换原则，物像交换原则的特点是补偿组在最短焦距与最长焦距时在同一位置，所以它对总焦距的影响是一样的。图中的 P 可看为变焦镜头的调焦组（前固定组）对某一调焦位置所成的像，在调焦距离确定的前提下，P 的位置是一定的；O 可以看做是变倍组，其位置变化范围限定在满足物像交换原则的区间内，它在两个特定位置时像面都位于 P'，但当它在其它位置时，像面位置都不在 P'。这时可以通过补偿组再成一次像，且令这个像必须位于 P' 处，这就要求变倍组与补偿组的运动服从一定的规

律，它们的位置必须严格一一对应。然后此像再通过后固定组成像于变焦照相机的底片上。后固定组是变焦镜头的起主要成像作用的光组，同时它也能补偿前边光组的剩余像差。

4. 光学补偿分几种？

光学补偿变焦距镜头是用其中几组透镜作变倍组和补偿组的。变倍组的各个透镜用机械方法连在一起作同方向等速线性运动。光学补偿法可分为正组在前和负组在前两种方法，是以变焦组中第一透镜组是正组还是负组来区分。同时它也可以根据变焦部分有几个透镜组分为：三透镜系统、四透镜系统、五透镜系统等。三透镜系统和四透镜系统用的较多。图 4-50(a)所示为正组在前的三透镜系统光学补偿法示意图；图(b)所示为负组变焦正组补偿四透镜系统示意图。光学补偿变焦镜头的变倍组与补偿组也是通过简单的机械方法联在一起的，使两者保持同步运动。此种镜头易于加工装配；但设计困难，易存在较大的像面漂移，目前还较少采用。变焦距镜头又分无级（连续）变焦型和分挡变焦型两类。按变焦环操作方式又分为转环式和推拉式两类。

三、怎样用近轴光学理论说明变焦过程？

1. 怎样画变焦镜头光路图？

机械补偿（负组变焦、负组补偿）变焦镜头光路原理图如图 4-51 所示，图中各光组都以薄透镜表示，实际中各光组都是复杂的光学系统。

变倍组与补偿组在初始位置（图中以实线表示）时的光路：前固定组（调焦组）1 对无限远调焦（物点位于主光轴无限远处），经过光组1成像于 P_1 处（即1的像方焦点处）为变倍组提供一个虚物，其物距为 S_2 ，成像于 P_2 处，像距为 S_2 ； P_2 为补偿组3的物点，其共轭像点位于 P_3 处； P_3 为后固定组4的物点，共轭像点为 P_4 。根据几何法求联合光具组基点的方法可知，经过联合光具组与平行入射光线共轭的出射光线跟主光轴的交点就是联合光组的后焦点，所以 P_4 即是 F 。

变倍组与补偿组于虚线所示的位置时的光路：为了改变变焦镜头的焦距需要改变变倍组的位置，对一定的调焦距而言，由于1的位置及焦距 f_1 的值一定，故 P_1 的位置一定，随着光组2向右移动其物距逐渐减小，当移到虚线所示的位置时其物距为 S_2^* ，像距为 S_2^* ，可见光组2的像点位置伴随着它的移动而改变；为了保持 P_3 的位置不变，光组3必须向左相应的移动（使其物距、像距、焦距三者满足高斯公式）；

由于 P_3 点位置一定，光组4的焦距也一定，因此 P_4 的位置就一定（底片的位置）；根据几何法求联合光组基点的方法可知：过出射光线跟入射光线延长线的交点的垂轴平面就是联合光具组的主平面。显然变焦组与补偿组在初始位置时的主平面过 H 点，焦距为 f ，变到虚线所示位置时主平面过 H^* 点其焦距为 f^* ，可见，在变焦组2与补偿组3移动过程中，即能改变变焦镜头的焦距又能保持像面稳定。

2. 焦距的变化跟什么因素有关？

由图4-51可知， $\text{tgu}_4 = \frac{y_1}{f}$ 在近轴条件下， $\text{tgu}_4 \approx u_4$ ，所以

$$f = \frac{y_1}{u_4}$$

经过变换（分子与分母都乘以相同量）即

$$f = \frac{y_1}{u_4} = \frac{y_1}{u_1} \cdot \frac{u_1}{u_2} \cdot \frac{u_2}{u_3} \cdot \frac{u_3}{u_4}$$

由第二章式（2-12）与式（2-15）可知：透镜的角放大率与横向放大率，在其两边介质相同的条件下互为倒数。和图4-54所示， u_1 为变焦组2的入射孔径角， u_2 为其出射孔径角， u_1/u_2 为其角放大率的倒数即横向放大率：

当变焦组向右移动过程中 x_2 在减小， f_2 一定时，由式（2-21）可知，

$\beta_2 = \frac{f_2}{x_2}$ ， β_2 在逐渐增大；同理，当补偿组向左移动过程中，

$$\beta_3 = -\frac{x_3}{f_3}$$

其中 x_3 逐渐增大， f_3 一定，故 β_3 也逐渐增大。如图所示，光组2与3由实线位置向虚线位置移动过程中，变焦镜头的焦距 f 与两光组放大率之积成正比，所以 f 在逐渐增大。

3. 怎样求变焦组与补偿组的位移量？求两个光组的位移量的问题，实际就是列方程与解方程的问题，我们只从原则上说明如下几点。

由图4-51，求出光组2向 P_1 移动一个距离 x_2 时，为保证像面不动，则光组3应随之作一位移 x_3 时的两个光组的物距与像距；焦物距与焦像距。

图中标的量都是几何量（按符号法则），但代入公式时要用代数量；

设

$$x - f = S, \quad x + f = S$$

根据以上基本知识，按照近轴光学理论公式（高斯公式和牛顿公式）：

$$\frac{1}{S'} - \frac{1}{S} = \frac{1}{f'}$$

$xx' = ff' = -f'^2$ (透镜置于空气中)

对两个光组分别列方程, 可得

$$a\eta^2 + b\eta + c = 0$$

其中 $a = f_2 + S_2 - s_3$,

$$b = -\zeta^2 + (d_{23} - S_3 + S_2)\zeta + (f_2 S_3 + S_2 S_3 + f_2 S_2 - d_{23} f_2 - S_2 d_{23})$$

$$c = [(d_{23} + S_2 - \zeta)(S_3 - f_3) - S_3 f_3]\zeta$$

所以补偿组的位移量 应由下式决定:

$$\eta = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

显然, 只要预先选定 f_2, f_3, d_{23}, s_2 和 s_3 , 可按诸方程算出 ζ 和 η 值, 一般来说, 当光组 2 作线性位移时, 对应的光组 3 位移是一个二次曲线。

4. 什么叫变倍比?

什么叫变倍比?

变焦镜头的最长焦距值与最短焦距值的比称为该变焦镜头的变倍比或叫变焦倍率, 简称变倍率。变焦距摄影镜头还常用其变焦倍数表示。例如法国产昂热尼厄 10×25 型变焦距电影摄影镜头 25mm 表示其最短焦距, 10 表示最长焦距为最短焦距的 10 倍即 250mm。

对变焦镜头的使用要求是什么?

对变焦镜头在性能方面要求是高变倍比、大相对孔径、大视场、对不同距离进行调焦; 在结构方面要求是体积小, 重量轻; 在像质方面要求是力求达到定焦距镜头的成像质量。显然这些要求是互相矛盾的, 同时都满足那是不可可能的。因此, 只有根据不同的实际要求来权衡利弊, 故有不同变倍比与变焦范围的变焦镜头。

变焦范围分几种情况?

变焦镜头的变焦范围有的从短焦距变到中长焦距; 有的从标准焦距变到中长焦距或长焦距; 也有的从长焦变到更长焦距; 有的变焦距镜头具有光学微距摄影功能, 但此类镜头的微距档一般在较小范围下才可获得较好的效果, 其放大率一般为 1:4 左右。

目前照相用变焦距镜头, 以变倍率不超过三倍者为最佳。电影摄影用的高倍比的摄影镜头, 如 5×、6×、10× 等, 其结构都是很笨重的。

四、变焦照相机的主要构造如何?

图 4-53 为 CANONEF - M 手动对焦自动曝光照相机实物图, 采用两种转盘, 可进行所有操作。

相机顶部配备两个大型转盘如图 4-54 所示, 一个控制快门速度, 另

一个控制光圈，每个转盘还能分别进行“ A ”（自动）设定，而光圈转盘则有一个“ L ”设定来切断相机电源，另外还有“ ISO ”设定功能，以便手动操作软片感光速度。

这两个转盘能提供 4 种摄影模式如图 4-55 所示。(a)为将两个盘都设定于“ A ”，就可收到程式自动曝光效果，相机就能自动选择快门速度和光圈；(b)所示的两种情况是将其中一个转盘解除“ A ”设定，就可切换到“快门先决式自动曝光”模式——让你选择快门速度，而由相机自动设定正确曝光所需的光圈；或“光圈先决式自动曝光”模式——让你选择光圈数值，而由相机自动选择恰当的快门速度；(c)所示为两个转盘，都解除“ A ”设定，相机就变成完全“手动”控制，这种相机还有 3 种镜后测准模式和机动软片输送功能。

图 4-56 所示为此种相机的结构图。图 4-57 所示为此种相机适用的各种镜头，有定焦距镜头（标准镜头，远摄镜头，广角镜头等），不同规格的变焦镜头，其焦距范围大约在 35mm~80mm 之间。图 4-58 所示为取景器显示的全部资讯图：凡需要知道的相机设定都可在取景器液晶显示屏上找到。它显示快门速度和曝光所选的光圈数值，并指示是否正在使用自动曝光锁功能。显示器还示出曝光补偿程度（ ± 2 级）。当自动软片速度被否决时，它还会自动切换到 ISO 显示。在“手动”摄影模式下，有三种标记来表示不足、过度或正确曝光。另外还有闪光充电信号和电池查核信号。

五、变焦镜头的主要构造如何？

变焦镜头的牌号很多，但主要构造都有许多共同点。以图丽 80mm~200mm，F4.5 变焦镜头为例。图 4-59 中(a)所示为调焦组（前固定组）及其相连接的调焦环与标字环。变焦镜头一般采用内调焦方式；图(b)为变焦组（变焦前组）、补偿组（变焦后组）及其相连接的调焦前环、变焦控制环、调焦后环等部分的图示；图(c)所示各部分，一方面可以与变倍组和补偿组联接，另一方面可以控制它们；图(d)所示为后镜组等部分。

六、变焦镜头的光学结构如何？

变焦镜头的光学结构都比较复杂，由下面几个实例可以看出。

例一：图 4-60 所示为 35mm 小型照相机的变焦镜头的光学结构图，变焦范围为 36~82mm，相对孔径可达 1:2.8。

例二：图 4-61 所示为英国泰勒·哈勃森公司生产的柯克 5 倍变焦距 35 毫米电影摄影镜头的光学结构图，此镜头变焦范围为 20~100mm，光圈调节范围为 $f/2.8 \sim f/22$ （T3.1~T22），调焦距离为 0.7 米~，对角线视场角为 $70^\circ \sim 16^\circ$ ，水平视场角为 $58^\circ \sim 12^\circ$ ，最大像场直径为 27.2mm，后顶焦距为 54.3mm，镜头总长（自像平面开始）370mm，最大直径（前端）为 145mm，重 4 公斤。在最大焦距和最近调焦距离处能被拍摄下的物体宽度为 89mm。柯克 5 倍变焦距镜头采用 14 组 21 片式的光学结构。图中所示为在 20mm 焦距，且对无限远调焦距光路图。图中 1 为调焦组，2 为变焦（变倍）组，3 为补偿组，4 为后固定组，调焦组前还有一

前固定组，或者将两者总体看为前固定组。

例三：图 4-62 所示为法国昂热尼厄公司生产的昂热尼厄 $10 \times 25T_2$ 型 10 倍 35 毫米电影变焦摄影镜头的光学结构图，其变焦范围为 25 ~ 250mm，最大相对孔径为 $1/3.2$ (T3.9)，最近调焦距离为 1.7m，该镜头由 11 组 14 片透镜组成。图中 1 为调焦组，2 为变倍组，3 为补偿组，4 为后固定组。目前，变焦距摄影镜头正向进一步改善成像质量、大相对孔径、大变倍率、小型化、较短的最近调焦距离、有微距装置、短焦距等方向发展。

第十二节 红外摄影有什么特点？

一、什么叫红外摄影？

红外摄影是利用含有红外辐射的光源和红外感光材料进行的摄影。红外辐射线在可见光谱的红色端以外，它是波长从 760 ~ 10⁶ 纳米的不可见光。但由于红外感光材料的膜层，只对近红外光谱敏感，因此，实际运用于红外摄影的只是波长在 760 ~ 1350 纳米的一段。

红外线具有很强的穿透能力。所以，红外摄影能够透过烟尘薄雾拍摄，也可以在夜间拍摄，目前已广泛应用于军事侦察、公安破案、航空摄影、医学、天文等领域。

二、红外摄影使用哪些器材？

1. 红外摄影使用什么样照相机？

除了专用的红外照相机外，各种类型的普通照相机都可以用于红外摄影。但是，不同类型的照相机，要使用不同规格的红外感光胶片或干板。另外，红外线能穿透木质材料、皮革、绸布等。因此，对于旧式照相机的木制镜箱、皮腔、暗盒应加上防止红外线透入的保护膜（黑色炭烟），否则负片上容易产生斑点、条纹和灰雾。但红外线对金属不能穿透，新式照相机箱体、暗盒及伸缩筒都采用金属的，对红外摄影最为安全。虽用普通摄影镜头安装红外线摄影滤光镜后可以进行红外摄影，但所摄影像质量远不如专用摄影镜头的效果。专用红（或紫）外摄影镜头属于超消色差镜头。

2. 红外摄影常用的滤光镜有哪些？

红外摄影所使用的红外胶片必须配合不同色调和类型的滤光镜。红外摄影应用的各种滤光镜如表 4-8 所示。

3. 常见的红外胶片有哪些？

红外胶片在感光范围、反差系数分辨率、稳定性等方面，跟普通的分色、全色胶片不同。

红外胶片的感光特性，商品标注用其灵敏度峰值对应的波长表示。例如红外 750，其感色范围波长在 550 ~ 900 纳米，

表 4-8 红外胶片应用的各种滤光镜

| 厂名 | 滤光镜编号 | 滤光镜颜色 | 吸收下列波长以内的射线(纳米) |
|----|-------|-------|-----------------|
| 柯达 | 15 | 深橙 | 520 |
| 柯达 | 25 | 淡红 | 600 |
| 柯达 | 29 | 中红 | 620 |
| 柯达 | 70 | 中红 | 670 |
| 柯达 | 89B | 殷红 | 690 |
| 柯达 | 88A | 深红 | 720 |
| 柯达 | 87 | 深红 | 750 |
| 柯达 | G4 | 黑红 | 770 |
| 蔡司 | G4 | 淡红 | 600 |
| 蔡司 | R10 | 浅红 | 630 |
| 蔡司 | R15 | 中红 | 670 |
| 蔡司 | R20 | 深红 | 700 |
| 蔡司 | R30 | 黑红 | 900 |

最大灵敏度对应的波长为 750 纳米；红外 700 纳米，其感色范围波长在 500~900 纳米，最大灵敏度对应的波长为 700 纳米，如图 4-63 所示。从图中可见红外感光材料按最大灵敏度峰值的波长分别为 700、750、800、850、950、1050 等几种。红外胶片上还注有“硬”或“快”的字样，“硬”表示反差系数较高，“快”表示感光度较高。

红外感光材料随灵敏度峰值波长的增加，其感光度、分辨率、反差与有效保存期都相应地下降，特别是稳定性表现得十分明显。例如 750 纳米的红外片有效期为一年，而 950、1050 纳米的红外片有效期只有二星期至一个月。红外胶片一般在 10℃ 以下，相对湿度 40%~60% 贮存，两年内尚可使用，若在冰箱中 -10℃ 左右贮存效果更好，几年内都不变质。几种常见的红外胶片如表 4-9 所示。

表 4-9 常见的红外胶片

| 胶片名称 | 国产保定 | 樱花 | 富士 | 柯达高速 | 波拉 413 |
|------|------|-----|--------|------|--------|
| 峰值波长 | 750 | 750 | 750820 | 840 | 820 |

三、红外摄影如何调焦？

用普通照相机进行红外摄影时，有两种情况，一种是用镜头的外框上刻有“R”标记的照相机，一种是用没有“R”标记的照相机。

用有“R”标记的照相机进行红外摄影时的调焦方法是：欲对某处景物进行红外摄影，若这时的物距为 S，首先对可见光进行调焦，然后将 S 距离刻线移到与“R”标记对准，拍摄后便可获得清晰的影像。

用没有“R”标记的照相机进行红外摄影的调焦方法有：伸长物镜法和算法。算法又分为近摄算法和远摄算法两种。

伸长镜法：根据薄透镜焦距公式

$$f' = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

可知，同一薄透镜对不同折射率的光其焦距 f 是不同的。因此，红外线通过镜头后焦距比可见光的焦距稍长，它们之间的距离约为 $f/250$ 毫米。如果对可见光调焦后，再将物镜伸长 $f/250$ 毫米，则 $f + f/250$ 毫米恰是镜头对红外线的焦距。如图 4-64 所示，图中实线表示镜头原位置，虚线表示镜头伸长后的位置， f 为镜头对可见光的焦距， $f_{\text{红外}}$ 为此镜头对红外线的焦距。

计算法

(a) 近摄时的计算

法：在拍摄近距离物体时，

首先用可见光对被摄景物调好焦，设物距为 I 、焦距为 f ；目视焦点和红外焦点的差数为 d ($d=f/250$)，红外摄影时的对焦距离为 L ，则 L 可按下式计算：

$$L = I + \left(d \times \frac{I^2}{f^2}\right) \quad (4-25)$$

例如：设普通摄影镜头的焦距为 50mm，两焦点差数 $d = \frac{f'}{250} = \frac{50}{250} = 0.2(\text{mm})$ ，物距 $I = 1000(\text{mm})$ ，则

$$L = 1000 + \left(0.2 \times \frac{1000^2}{50^2}\right) = 1080(\text{mm})$$

(b) 远摄时的计算法：如无限远景物已聚成红外线清晰焦点，此时可见光的调焦距离可按下式算出：

$$L_0 = f^2/d \quad (4-26)$$

式中 L_0 为可见光的调焦距离。

例如：设镜头焦距为 50mm，两焦点之差 $d = 0.2\text{mm}$ ，则可见光的调焦距离为

$$L_0 = 50^2 \div 0.2 = 12500(\text{mm})$$

第十三节 感光底片有什么特点？

一、感光底片有什么作用？

感光底片是一种记录和存储光学信息的元件，它不仅能用图像反映景物的形状和尺寸，而且可以用影像的“黑度”反映感光的强度。感光底片除了用于一般摄影和复制缩放文件以外，还大量地用于激光技术和信息处理中。做为信息处理的重要介质，感光底片可以把数据送到处理系统里，同时也印载和记录处理的结果。

感光底片的感光作用是由感光材料引起的。受光辐射作用后的感光材料，经过化学上的显影、定影处理，可以重现被拍摄景物的形状。

世界上用到的感光材料已有四百多种。但在照相摄影方面，应用最多的感光材料仍然是卤族元素的盐类，如氯化银和溴化银等。就它们的感光特点、影像的耐久性和制造的工艺性来说，都能达到很高的技术要求。

二、感光底片的构造如何？

感光底片是一种多层结构的元件，如图 4-65 所示为黑白底片和黑白正片的基本结构。其中片基是底片的支撑体，它用硝酸纤维或醋酸纤维制成。前者比较经久耐用，胀缩率小，燃点低，易燃烧，故常称为“不安全片”；后者牢固可靠、不易燃烧，常称为“安全片”，但是质脆、胀缩率大。近几年来，涤纶片基的研究有了很大的发展，由于涤纶片基兼顾了两者的优点，是一种有前途的片基材料。

乳剂层是感光底片的核心部分。它是由悬浮在照相明胶里的卤化银晶粒组成的，晶粒的最大直径为 $1\sim 2\mu\text{m}$ ，最小直径为 $0.1\mu\text{m}$ 。从照相的效果上看，晶粒的直径在保证一定感光速度下越细越好。目前常用的感光物质以氯化银和溴化银为主。负片的感光层分两部分，上乳剂层是由感光速度快的物质构成，下乳剂层是由感光速度较慢的物质构成。这种结构可以使底片对照度有较大的作用范围。照相明胶是一种分散物质，它起着不使感光物质凝聚和沉积的作用。

片基和乳剂层之间是结合层，它可以使乳剂牢固地贴附在片基上。底片最上层是保护层，可以防止乳剂被划伤和防止受摩擦作用而产生影像不清楚的“摩擦灰雾”。

片基的背面是背面层，也叫做防光晕层。其作用是吸收掉透过片基的光线，使这部分光线不再反射回去。如果这部分光线返回乳剂层，就会产生双影，或是使背景发亮，影响像的对比度。此外背面层还可以防止静电作用，静电作用可以使底片在冲洗后出现条斑状的静电花纹。多数感光底片涂有绿色和蓝紫色的防光晕层，彩色底片有涂黑色防光晕层的。

彩色底片更为复杂，它的乳剂层由许多层不同的感光材料组成，以便形成各种颜色。照相纸和干板也是重要的感光元件。它们的结构，除了在支撑体材料上有所不同之外，与感光底片没有很大的区别。照相纸的支撑体是硫酸钡浸过的纸基；干板的支撑体是玻璃。

感光过程是很复杂的，它基本上是一种光化作用结果。在光照射下，卤化银中的银离子还原成银原子，它们聚积在受光点附近，形成一个银斑，这银斑通常称为“潜影”。把这样的底片放到显影液里，靠近“潜影”的银离子继续还原，使银斑的密度加大，直到形成可以清楚辨认的黑度。

图像的质量，如条纹分辨率，图像清晰度和层次，颜色还原等，除了与照相的条件、物镜的质量、拍照时用的光学参数有关外，在很大程度上，决定于底片的特性和洗印的条件。

三、胶卷的照相性能有哪些？

1. 什么叫曝光量（倒易律）及其失效？

曝光量是像面照度和曝光时间的乘积，即

$$H = E \times T \quad (4-27)$$

式中 H 表示曝光量（单位为勒克司·秒）， E 为像面照度， T 为曝光时间。

上式表明，感光材料经曝光后发生光化反应，其效果与照度跟曝光时间的“乘积”成正比。感光材料经曝光后的光化程度，完全由曝光量的值来决定。当像面照度高时，曝光时间就要短；像面照度低时，曝光时间就要长。只要总曝光量一定，光化效果（程度）就一定，感光材料变黑的程度也一定，在这种总效果不变的条件下，像面照度和曝光时间可以互相调整。这种像面照度和曝光时间对于相同曝光量的相互关系称为互易效应或称互易律、倒易律、倒数律等。这一规律适用的条件是：

恒定的光源如日光；频率不超 1000Hz 的闪光光源。但当照度很低时（如星光、日光等），需要长时间曝光或曝光时间极短的强闪光、脉冲光时，倒易律均失效。通常的感光材料在低照度长时间曝光时或高照度、超过千分之一秒的短时间曝光时，都会产生失效现象。此时感光材料的一系列性能，如密度、感光度、反差、宽容度、感色性等均会有所改变。在这种情况下，就需要增加曝光量和调整显影时间来加以补救。在拍摄彩色片时，由于倒易律失效，还会造成色彩平衡上的变化，所以还需要加用滤色镜予以补偿。现在，有些供专业用的彩色胶片，因考虑到三层乳剂倒易律失效情况不同，特分为长曝光型与短曝光型两种胶片，以达到比较理想的彩色平衡。

2. 什么叫光学密度？

胶片的变黑程度用光学密度来量度。经过曝光和显影后黑白底片上形成了各种黑白影像。黑色部分的“黑度”表明了它的阻光能力，或称阻光率，它与银的沉积密度有直接关系。阻光率或黑度与感光强弱有密切的关系，通过感光测定可以得到“黑度”与感光强度的关系。

底片上图像的阻光率与透过率是对应的（互为倒数）。在光度学中透过率是透过光强度 I_1 与入射光强度 I_0 的比值，用 T 表示，则：

$$T = I_1 / I_0$$

底片的阻光率用其倒数表示，则

$$O = \frac{1}{T} = \frac{I_0}{I_1} \quad (4-28)$$

底片的阻光率 O 与银粒密度有关。如果忽略入射光在底片上的反射和吸收损失，银料密度——光学密度 D 为：

$$D = \lg O = \lg \frac{1}{T} = \lg \frac{I_0}{I_1} \quad (4-29)$$

3. 什么叫照相特性曲线？

同一批号的感光胶片是用同一次制成的感光乳剂涂布而成的。胶片在出厂时都要抽出样片在感光仪上按规定的条件曝光、冲洗、然后用光密度计测出光密度，将对应的曝光量与光密度标绘在坐标纸上就得到照相特性曲线如图 4-66 所示。曲线的纵坐标为光密度 D ，横坐标为曝光量 ($H = ET$) 的对数。这个曲线按照变化规律可以分成五部分：

当曝光量低于某一值时，光学密度 D 与曝光量无关。甚至没曝光的底片显影后仍有一定的密度，对光线有一定阻力，这是感光材料本身化学性能不稳定性造成的。这段曲线对应的光学密度 D 。叫做“灰雾度”；

曲线的 AB 段称为趾部，也叫做曝光不足部。该段曲线的光学密度与曝光量不成比例。如果在这个区域里照相，影像的层次将受到较大而不成比例的压缩；

曲线的 BC 段称为直线部分，也称为正常曝光部分。这段曲线表明：随着曝光量的增加，光学密度 D 与 $\lg H$ 成正比。如果在此区域里照相，影像的明暗层次可以成比例地被记录下来；

曲线 CD 段称为肩部，也叫曝光过度部分，光学密度与曝光量也不成比例地变化。如果在这个区域里照相，影像的明暗层次也要受到不成比例的压缩；

曲线达 D 点，光学密度最大，随后曝光量再增加，底片的光学密度反而减小，所以 D 点以后的曲线称为反转部。D 点对应的是最高密度值。

不同的感光材料其特性曲线是不同的。同一种感光材料，在不同的显影条件下冲洗，特性曲线也不同。所以在确定底片的特性曲线时，必须规定统一的显影标准。

4. 什么叫感光度？

感光度是感光材料的光化速度（感光快慢的特性），是感光材料对光强的敏感程度。在同样冲洗条件下，同一个曝光量使用不同的材料感光，所得密度大者感光度高，小者感光度低。标准中规定：用产生一定密度所需要的曝光量的倒数表示感光强度 (S) 则

$$S = \frac{K}{H} \quad (4-30)$$

式中 K 值是一个常数。现在各国规定的标准密度和 K 值都不一样，所以感光度 (S) 也不同，如表 4-10，(a)，(b) 所示。

表 4-10 (a)

| 科目 国别 | 密度 D 规定 | K (规定) | 计算公式 |
|----------|--------------|--------|------------------------------|
| 中国 GB | $D_0 + 0.65$ | 4 | $S = \frac{4}{D_0 + 0.65}$ |
| 德国 DIN | $D_0 + 0.1$ | 0.49 | $S = \frac{0.49}{D_0 + 0.1}$ |
| 美国 ASA | $D_0 + 0.1$ | 0.8 | $S = \frac{0.8}{D_0 + 0.1}$ |
| 苏联 TOCT | $D_0 + 0.2$ | 1 | $S = \frac{1}{D_0 + 0.2}$ |

表 4-10 (b)

| 国别 | 感光度性 | | | | | | | | |
|---------|-------|----|----|----|-----|-----|-----|-----|------|
| | 中国 GB | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 |
| 德国 DIN | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 | 31 |
| 美国 ASA | 6 | 12 | 25 | 50 | 100 | 200 | 400 | 800 | 1000 |
| 苏联 TOCT | 5 | 11 | 22 | 45 | 90 | 180 | 300 | 600 | 800 |

5. 什么叫反差系数?

底片的反差系数也叫做 γ 值,它是拍摄后的影像明暗对比与对应的景物明暗对比的比值。景物或影像上不同部位的明暗差别叫做景物或影像的反差。景物的反差就是各部位的光亮度差别,光度学中用两部位光亮度比的对数值来表示。按对数计算法则,该值就等于两部位光亮度的对数之差。对底片而言,反差的应该从透光的强度引出,这与景物用光亮度定义反差是相应的,底片反差用同一光强照射下透光强度比值的对数表示。根据光学密度定义,这个值也等于光学密度的差值,则底片的反差系数为

$$\gamma = \frac{\text{影像的光学密度差}}{\text{曝光量的对数差}} \quad (4-31)$$

=影像的光学密度差/曝光量的对数差 (4-31) 因此底片的反差系数可由其特性曲线中求得。如图 4-66 上所示, M 与 N 是曲线上任意两点,其对应的光学密度和曝光量的对数值分别为 D_M 、 D_N 与 $\lg H_M$ 、 $\lg H_N$, 则:

$$\gamma = \frac{D_M - D_N}{\lg H_M - \lg H_N} = \text{tga} \quad (4-32)$$

对于曲线的直线部分,反差系数等于直线的斜率。底片的反差系数决定于感光乳剂的配方。一般情况下,晶粒细而均匀,反差系数就大。常用的全色胶卷,反差系数为 0.7~0.85 之间。

6. 什么叫宽容度?

胶片能够按比例地表现景物亮暗对比,真实地反映景物中丰富的明暗层次的范围,叫做感光胶片的宽容度。它是用特性曲线直线部分 BC 两端所对应的曝光量的对数值的差来表示的,即:

$$L = \lg H_C - \lg H_B \quad (4-33)$$

在保证其它性能的前提下,底片的宽容度越大越好。这样,选取曝光量的自由度可以大一些。

7. 什么叫灰雾度？

感光底片不经曝光，显影后所产生的光学密度称为底片的灰雾度 D_0 。它是乳剂化学性质不稳定造成的，与感光材料的质量保存的时间和方式、显影的条件和技术都有密切的关系。灰雾现象的存在影响了图像明暗阶调的再现，使画面对比度下降。所以灰雾度应该控制在一定范围内，一般要求 $D_0 < 0.2$ 。

8. 什么叫最高密度？

在特性曲线中，D 点所对应的光学密度为底片所能达到的最高密度值，也就是底片能达到“最黑”程度。在摄影时，应该要求最亮部分的密度值不要超过这个值。

9. 什么叫底片的分辨率？其与清晰度有何不同？

分辨率也称鉴别率、解像力、分辨本领。底片分辨率是记录特性的重要指标，它表示了底片分辨和记录景物细节的能力。通常情况下，以每毫米内能分辨黑白线条的数目来表示底片的分辨率。测定底片分辨率的方法是：以一块透明的分辨率板直接压在底片上，使其曝光，洗印后得到形状完全一样的图样，从这张图样里分辨出能够看得清的最密条纹，以这组条纹的密度，即每毫米内黑白线条对数表示底片的分辨率。与检验物镜的分辨率一样，这种方法只能给出高对比线条的分辨率，而底片对于低对比线条的分辨能力跟底片对高对比线条的分辨能力是有差别的。

国产 21° 胶片的分辨率只有 80~90 线/毫米，这个值很低，制版工业中用的超微粒干版分辨率很高，其值可达 2000 线/毫米。

底片的分辨率主要与感光材料的颗粒度和乳剂层的厚度有关。颗粒愈细、乳剂层愈薄，底片分辨率愈高。此外，颗粒间的散射与感光层之间的反射、以及洗印条件对底片分辨率都有影响。

分辨率与清晰度是不同的：分辨率是在一毫米范围内能使线条互相分离成像的数目，以此来记录景物的细部；清晰度是指所记录的景物中，不同密度的相邻细部之间分界的明锐程度，即黑白线条对间的边缘轮廓是否清晰。

10. 什么叫颗粒度？

感光底片经曝光洗印以后，形成影像的银粒粗细程度称为颗粒度。感光度相同的底片，以颗粒度细者为好。颗粒度跟晶粒大小、晶粒的均匀程度有关，也跟显影的温度和时间有关。

11. 什么叫感色性？

底片对于各种波长的光线具有不同的敏感性，其程度和范围称之为感色性。氯化银和溴化银本身都能对短波有反应，加入有机染料后，感光的波段有所增加。底片按感色性可分为：

“盲色片”，以溴化银为主的乳剂只对蓝光敏感，这种底片叫做“盲色片”；

“分色片”，在乳剂中加入染料后，若感光范围扩大到绿光，这种底片称为“分色片”；

若加入颜料后，感光范围进一步扩大到红光，这种底片称为“全色片”。图 4-67 示为各种底片的感光范围与敏感度曲线。

感色性好的底片对所有颜色都能真实地以深浅不同的色调反映出

来，使底片有较强的层次和色感。

12. 什么叫彩色平衡？

彩色感光材料中三层感光乳剂的照相性能一致性就叫做彩色平衡。感光测定时，在一张特性曲线坐标纸上分别绘制出感蓝乳剂层、感绿乳剂层与感红乳剂层的三条特性曲线。若三条曲线重合，就表明彩色感光材料中三乳剂层的摄影性能完全一致，达到了彩色平衡。实际的感光材料是不能做到的。说明彩色平衡的指标主要有：

感光度平衡，要求最高感光度不得超过最低感光度的 2.3 倍（彩色正片不得超过 4 倍）；

反差平衡，最大反差系数跟最小反差系数的“差”，一般不得超过 0.21。

彩色感光度不平衡时，那层感光度高就偏那一种颜色。

彩色反差不平衡，就是三层感光乳剂层的 γ 值各不相同，结果是相同的景物反差却在不同分色层上形成不同色影对比度，彩色合成再现景物色彩时出现失真。这种亮部与暗部色彩对比的不一致，是难以用滤色镜校正的。

多层彩色感光材料的宽容度要用红、绿、蓝三条感光特性曲线直线部分的公共部分来表示，所以彩色片的宽容度通常都小于黑白片的宽容度。

第十四节 反射式和折反式摄影镜头有什么特点？

除了由透镜组成的摄影镜头之外，还有由反射镜组成的反射式摄影镜头和由反射镜与透镜组成的折反式摄影镜头。反射式物镜具有一些折射式物镜不具备的优点：

不产生色差；

可扩展波段，由可见光扩展到不可见光（红外光和紫外光）；

可加大工作距离。

但是反射式物镜由于工艺上未达到成熟程度，故未被普遍采用。尽管如此，反射式与折反式物镜应用也很广。例如标准镜头、长焦镜头、望远镜镜头、显微镜头等都有折反式的。

一、包沃斯共心折反光学系统有什么特点？

包沃斯共心折反光学系统的光学结构如图 4-68 所示。其特点是：透镜的两个球面与反射球面的中心是重合的，并在此中心处设一光阑。因此通过光阑中心向各方向的光线都垂直于折射表面和球面镜，可以看做为光轴，故不存在轴外光线，也就不存在轴外像差（像散、慧差、畸变等像差）；反射镜是不存在色差的，弯月型透镜满足一定条件时也不产生色差；但反射镜产生球差可以由透镜的球差来补偿。但是，此共心物镜对无限远物平面所成的像，并不是一个平面，而是在以其焦距为曲率半径的一个球面上。这种物镜的相对孔径可达 $1/0.8$ 或更大。这种物镜可拍摄照度很低的物体，如拍摄荧光屏上 X 射线等。

二、三组五片式折反镜头有什么特点？

一般折反式摄影镜头属于长焦距摄影镜头，视场较小，跟视场有关的像差也比较小，因此可不采用共心结构。此类镜头，虽焦距较长，但整个镜头的长度明显缩短，直径稍有增粗，整个外形比较小巧轻便。长焦折反型摄影镜头相对孔径较小，一般为 $1/8 \sim 1/11$ ，不适于拍摄低照度的物体。图 4-69 所示是一种典型的三组五片式折反摄影镜头的光学结构及光路图。此镜头中的透镜 1 的后面中央部位镀有圆形反光层，透镜 2 在中央部位开有圆孔（直径与圆形反光层的直径相同），透镜 1 与透镜 2 胶合在一起。透镜 3 是表面镀有反光层的圆环形透镜。透镜 4 与透镜 5 胶合成一组。自景物投射来的光线，经透镜 1, 2 的折射后，投射到透镜 3 的凹形反光表面，然后被反射到透镜 1 背面的反光层上，再经过反射后，穿过透镜 3 中央孔，到达透镜 4 处，最后经透镜 4、5 的折射，在像平面上结成清晰的影像。

三、反射式与折反式望远镜有什么特点？

由于反射镜能反射较大的光谱范围的光而无色差，又较容易获得大孔径，反射镜的形状又可以校正球差，所以大孔径的天文望远镜多是由

反射镜（如回转抛物面反射镜等）做成。根据聚光本领与分辨率公式：

$$E' = \frac{1}{4} K \pi B \left(\frac{D}{f'} \right)^2 \quad (2-71)$$

$$\Delta y' = 1.22 \frac{\lambda}{\frac{D}{f'}} \quad (2-78a)$$

$$N = \frac{1}{\Delta y'} = \frac{1}{1.22 \lambda} \cdot \left(\frac{D}{f'} \right) \quad (2-80)$$

可知欲提高天文望远镜的分辨率和增大接收光的能力 相对孔径 D/f' 必须大，其中 f' 很大，孔径 D 必须相应的要大（有的物镜直径可达几米）。若制造这样大的折射式望远物镜，无论是在工艺制造上还是光学玻璃的熔炼方面或是加工过程等方面都是困难的。反射式物镜却不然，不但可以设计得很轻巧，还降低了对材料的要求。因为光线不经过材料本身，因此不需要对玻璃的性能提出过高的要求。早期的天文望远镜有用单个抛物面做成的，能很好地校正球差，不产生色差，但慧差严重，因而只能在小视场下工作。后来就改用双反系统了，其中比较著名的有卡塞格林系统和格利果里系统。反射式望远物镜可用在非可见光的摄影上。

1. 双反系统指什么？

卡塞格林系统，此系统是由两个反射镜组成，光学结构与光路图如图 4-70 所示。主镜是抛物面，副镜是双曲面。自无限远景物的光线射到主镜上后被反射到副镜上，再经副镜反射后成清晰的倒像于像方焦平面处。这种系统筒长 l 比较短。

格列果里系统，系统的光学结构与光路图如图 4-71 所示。其主镜也是抛物面，副镜是椭球面，所成的像是正立的，此结构筒长 l 较长。

2. 折反系统是什么？

反射系统对轴外像差校正是很困难的，因此一种新型的折反系统逐渐发展起来。理想的折反系统中的反射镜应该是非球面的，但因非球面加工困难，不能大量生产。常以球面为基础，加入一定的折射元件，用来校正球差，也可得到较好的效果。其中比较著名的折反射式望远镜有施密特物镜和马克苏托夫物镜。此外，在反射系统基础上在不同位置加上各种折射元件，以对某些像差进行补偿，有许多成像质量较好的折反式望远镜。

施密特物镜

施密特物镜的光学结构与光路图如图 4-72 所示。校正板是个透射元件，其中一个面是平面，另一个面是非球面。这种物镜是施密特于 1931 年提出的，用于天文望远镜中，球面反射镜作主镜，系统没有色差，因为球面反射镜没有色差，校正板几乎近于平板，所产生的色差极小（可忽略不计）；因光阑设在反射镜曲率中心处（也就是校正板处），所以也就没有慧差和像散与畸变仅产生球差和场曲。校正板的非球面的面形能够使中央的光束略有会聚，而使边缘的光束略有发散，这样能使整个系统的球差得到很好的校正。场曲的半径为主镜球面半径的一半。若在焦平面上把像面做成球面，就能消除场曲的危害。

马克苏托夫物镜

此种物镜的主镜是球面镜，负镜是弯月型厚透镜，其光学结构及光

路图如图 4-73 所示。当弯月型厚透镜的结构满足

$$r_2 - r_1 = \frac{1 - n^2}{n^2} d \quad (4-34)$$

时就不产生色差，故此时整个系统就不存在色差，但它的球差可补偿主镜产生的球差。光阑和厚透镜的位置接近于主镜的球心，因此产生的轴外像差很小。如果适当地改变透镜和主镜的参数，利用间隔变化还可以校正慧差。

施密特——卡赛格伦照相物镜

图 4-74 所示为施密特——卡赛格伦系统，此系统具有双反系统与施密特系统的特点。

四、反射式与折反式显微物镜有什么特点？

由显微物镜的分辨率公式

$$\Delta y = 0.610 \frac{\lambda}{n \sin u} \quad (2-79)$$

$$N = \frac{1}{\Delta y} = \frac{n \sin u}{0.610 \lambda} \quad (2-80(a))$$

可知在保持其数值孔径（ $n \sin u$ ）不变的条件下，改用波长短（小）的紫外光通过显微物镜成像，可提高其分辨率，因而有紫外显微镜。由于玻璃不透过紫外光，因此紫外显微镜多由反射镜组成。反射式显微镜在红外光中也有许多应用。除了纯透镜型的和纯反射镜型的显微镜之外，还有由反射镜和透镜联合组成的折反型显微物镜。

反射式显微物镜比较典型的有：

图 4-75 所示是典型的双反显微物镜中的一种光学结构，由两个反射镜组成，它们都不产生色差，整个系统也无色差，两者的球差和慧差可以互相补偿。这种系统的数值孔径可达 0.5，可用作紫外显微物镜。

A 为被研究的微小物体，置于该物镜的近处， A_1 是通过反射镜 1 成的像， A_1 也是反射镜 2 的虚物，其共轭像为 A_2 ， A_2 也是整个系统成的实像。

牛顿物镜如图 4-76 所示，光学结构是由平面反射镜和球面反射镜组成。以上两种都是基本结构。

折反式显微物镜跟反射式显微物镜相比可以增大数值孔径。例如在图 4-75 所示的结构基础上，在反射镜 2 的前面加一半球透镜，就能提高其数值孔径。如图 4-77 所示，半球透镜 1 所产生的色差可由反射镜 2 的折射面所产生的色差来补偿。在浸液时，数值孔径可达 1.35，能够用于紫外光成像，实现提高分辨率的目的。不过透镜需要用能透紫外光的石英玻璃、萤石等材料。这种结构只是基本结构，要进一步提高其光学性能必须进一步复杂化。

图 4-78 所示为紫外光折一反式显微物镜光路原理图，其中透镜光学材料均应用能透紫外光的石英和萤石，主要的聚焦成像则采用球面反射镜，它与材料的透光性无关，上面的窗口也用透紫外光的石英材料。

第十五节 常见的取景器有几种？

一、取景器在技术上应满足哪些要求？

取景器是照相机的必要组成部分之一，在技术上应满足：

从取景器里看到的景物应跟实物相同，在形状上不应有明显的畸变；

从取景器中看到的景物应是正立的；

取景范围应与实际拍照范围一致，同时也要与计划拍照的范围相同。

二、什么叫视差？如何消除？

1. 什么叫取景误差？

取景范围跟计划拍照范围的不一致叫做取景误差。它是由取景器本身的结构和质量决定的。

2. 什么叫视差？如何消除？

实际拍照的范围相对于取景范围的偏差称为视差。视差产生原因是取景器的光轴跟镜头的光轴不一致。如图 4-79 所示，为简单起见，取景器的物镜与照相机的镜头都用薄透镜表示，图中 L_1 表示取景器物镜， L_2 表示摄影镜头， b 为两个光轴间的距离，由取景器中所看到的范围为 AC ，照相系统拍照的范围为 BD 。如果不存在视差时，取景器光轴上的 P 点通过镜头应成像于底片上的 O 点。但因为存在视差， P 点的共轭像点却成于 P' 点， $P'O = L$ 叫做对距离 L 处调焦时取景器所具有的视差。由图中带阴影的两个相似三角形的对应边的关系，则

$$\omega = \frac{L'}{L} b \quad (4-35)$$

该式表明，在像距 L' 一定时，视差与景物距离 L 及两光轴间的距离有关。摄影距离愈远、光轴间距离越小，视差愈小。当取景器和照相机物镜的光轴重合即 $b = 0$ ， $\omega = 0$ 。

视差的消除是靠机械结构来实现的。如果随着拍摄距离的调整，将取景框由 EE' 位置摆动到 $E'E''$ 的位置，则由取景框所选的范围刚好是实际拍照的范围。

三、照相机中常用的取景器有几种？

照相机的取景器种类很多，常用的取景器有：逆伽利略望远镜式取景器、亮框取景器、毛玻璃取景器等。

1. 逆望远镜式取景器有何特点？

逆望远镜式取景器是由凹凸两块透镜组成的望远镜系统，因为它是凹透镜在前作为物镜，凸透镜在后作为目镜，其物镜与目镜的位置刚好与伽利略望远镜颠倒。故而称为逆望远镜式。图 4-80(a)所示为伽利略望远镜光路图；图 4-80(b)所示为逆伽利略望远镜光路图。

望远镜的放大本领表示式如何？

由式(2-83)可知放大本领等于像与物对眼睛的张角的正切之比。因眼离望远镜目镜很近,因此可用物与像对目镜光心的张角来代替如图4-80(a)所示,无限远处P点的平行光束对眼睛的张角(视角)又可近似等于其对 O_1 的张角即

$$\text{tg}\omega = \frac{-y}{f_1}$$

出射光线对眼睛的张角近似等于其对 O_2 的张角则

$$\text{tg}\omega' = \frac{-y}{f_2}$$

将此二式代入2-83(a)中则

$$M = \frac{f_1}{f_2} = -\frac{f_1}{f_2} \quad (4-36)$$

伽利略望远镜,物镜的像方焦距为正,目镜的像方焦距为负,放大本领为正值,故形成正立的像。

这一规律对逆伽利略望远镜完全适用。通常逆伽利略式取景器的视放大率在0.35~0.85间。取景器的视场角要略小于照相镜头的视场角,因为这种取景器存在着取景误差,这样可以保证从取景器中所观察到的景物都可以拍摄下来。这种系统的出射光瞳就是眼睛的瞳孔,视场光阑就设在物镜框上。

逆伽利略望远镜式取景器有什么优缺点?

逆伽利略式取景器其优点是结构小巧紧凑。其缺点主要有二:第一,由于视场光阑跟景物不是成物像关系而导致渐晕现象的出现;第二,是产生取景误差。随着眼睛观测位置的改变,取景范围也随之改变,产生了取景误差。如图4-81(a)与(b)所示:图4中 $|$ 表示出射光瞳(即瞳孔),从图(a)中可见,当瞳孔分别放在物镜与目镜的焦点处及轴外副焦点处所观察到的景物范围是不一致的;从图(b)中则可以看到当瞳孔沿轴移动时,在移动过程中所看到的景物范围也随之变化。当观测位置一定时,若瞳孔大小不同时,则观察到的景物范围也不一样,如图4-81(c)所示,图中符号 ϕ 也表示瞳孔的大小。

2. 亮框取景器有什么特点?

亮框取景器的光学结构如图4-82所示。它由两部分构成,第一部分是逆伽利略望远镜结构,它是该取景器的观测系统;第二部分是控制取景范围的亮框AA,亮框AA只有四个角是透光的,它经过放大镜以一个虚像的形式成像在目镜的焦点附近,跟景物通过物镜形成的虚像重合在一起。亮框所控制的范围就是取景的范围。

亮框取景器不仅能取景,同时也能测距,测距原理可用图4-83的结构来说明。图中有两条光轴互相平行的光路:

由物镜 L_1 和目镜 L_2 组成的逆伽利略望远系统;

由反光镜EE、物镜 L_2 、目镜 L_3 构成的逆伽利略望远系统。其中 L_1 与 L_2 是完全相同的两块负透镜,两条光路的平行间距 b (为测距的基线)。

观测无限远景物时,反射镜EE与基线 OO' 相交 45° 。从光路2(右)进来的光线,经过反射镜EE与半反射镜FF的反射与左光路(光路1)进来的光线重合,因此便形成一个重叠的统一的像。在拍摄近距离物体时

(比如物 A)，A 通过左光路在眼睛里所形成的像在 AOB 光轴上，同一物通过右光路，在眼睛里所成的像在 AO FB 轴上，两个像不重合，故观察者看到的是两个分开的像。其原因是 Q 不等于零所致。如将反射镜旋转角时，刚好使 EE 反射后的光线跟 OO 轴重合，这时眼睛所看到的两个像是重合的。反射镜跟摄影镜头是联动的，在反射镜转动时就能带动摄影物镜沿轴移动，故而可以调焦。使图 4—83 中两个光路的像重合而测出目标距离的方法，通常叫做对双像进行“规正”。在照相系统中常用的规正装置就是旋转反射镜结构，该结构中平面反射镜旋转的角度与距离 L 的关系，由平面镜成像原理可知 $\alpha = 2\theta$ ，由上图则

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \operatorname{tg} \theta = \frac{b}{L} \quad (4-37)$$

在照相系统中可以“规正”双像进行测距的机构，除了旋转反射镜外，还有移动负透镜的结构，正负透镜相对摆动的结构及旋转双光楔的结构等。

3. 毛玻璃取景器有什么特点？

图 4—84 所示为几种常见的毛玻璃取景器。图(a)所示结构用于座机，所形成的像是倒立的；图(b)所示的结构用于双镜头反光照相机，所形成的像是左右颠倒而上下正立的。由于取景光路与摄影光路是平行而不重合的，因此，这种取景器存在着视差；图(c)所示的光学结构是目前单镜头反光照相机中常采用的一种取景装置。这种取景器中的屋脊棱镜在该装置中起正像作用。

用毛玻璃取景时，毛玻璃就放在取景物镜的像方焦平面的位置，它也相当于底片所在的位置，如果用眼睛调焦时看到的影像清晰了，就可以进行拍照，而且底片上的影像也必定是清楚的。因此毛玻璃取景器既可取景，又可以调焦。但是，由于毛玻璃本身的散射作用，使得调焦的影像变得模糊不清。

4. 什么叫屋脊棱镜？

具有两个以上相互斜交之平面的光学元件称为棱镜，屋脊棱镜是棱镜中的一种。根据棱镜在光路中的作用，可分为反射棱镜和折射棱镜。

反射棱镜

反射棱镜根据不同需要又可分为：一次反射棱镜，其反射成像性质与单个平面反射镜一样；二次反射棱镜，相当于双平面镜系统。在这类反射棱镜中，光线经两个反射面依次反射后，反射光线相对于入射光线偏转的角度，为二反射面间的夹角的二倍。例如当两个反射面间的夹角为 22.5° 、 30° 、 45° 、 90° 和 180° 时，则出射光线相对于入射光线的夹角分别为 45° 、 60° 、 90° 、 180° 和 360° 。图 4—85 所示(a)为一次反射棱镜，(b)为二次反射棱镜，(c)为三次反射棱镜。

为了达到一定功能要求，将几块棱镜组合成棱镜组例如由两块直角棱镜胶合在一起，中间有一半反半透金属镀层，可以把光分为两部分，在两个方向成像，如图 4—86 所示。

下面介绍一下反射棱镜的几个基本概念。

(a)工作面：反射棱镜通常有两个折射面与若干个反射面，统称为工作面；

(b)棱：棱镜的两个工作面的交线称为棱；

(c)主截面：垂直于棱的截面称为主截面。图 4—86 与 4—85 所示都是主截面。

屋脊棱镜

两个互相垂直的工作面叫做屋脊面，带有屋脊面的棱镜称为屋脊棱镜。例如图 4—85 中的 与 都是屋脊三棱镜；图 4—84(c)中的屋脊五棱镜（起倒像作用）。

折射棱镜

最常见的折射棱镜是主截面为三角形的三棱镜。在折射三棱镜上，光线入射面与出射面之间的顶角称为顶角，顶角所对的棱镜表面叫做底面。如图 4—87(a)所示，单色光通过两个折射面后，逐次向底面偏折；如图(b)所示，当复色（白）光通过两个折射面后，该白光发生色散，在幕上形成一条由红、橙、黄、绿、青、蓝、紫诸色光构成的光谱。因为各种单色光折射率不同，所以经三棱镜折射后偏折程度不同。

光楔

棱镜的顶角也叫折射角，折射角很小的棱镜称为光楔，它在光学仪器中有很多应用。如影像分离的对焦装置就有光楔。

5. 带场镜的毛玻璃取景器有什么特点？

为了克服毛玻璃的散射造成影像模糊的缺点，在毛玻璃屏上增设一块场镜如图 4—88 所示，使物镜的出瞳成像在眼睛的瞳孔附近，这样进入物镜的光束都能被眼睛接收，故而能达到提高影像清晰度的作用。但是如果取景面（视场）较大时，场镜的横向尺寸和厚度都必须很大，取景器就会笨重。因此在现代的相机中，场镜已完全被菲涅耳透镜所代替了。

6. 什么叫菲涅耳透镜？

菲涅耳透镜也叫螺纹透镜（或叫同心圆阶梯透镜），是菲涅耳于 1919~1920 年首先提出并把它用在灯塔上的，1922 年完成并获得成功。

菲涅耳透镜每个环带相当于厚透镜的一个环带，各环带所构成的透镜焦距不等，但必须保证各环带的焦点相同，故可消球差。如图 4—89 所示，它是把球面等间距也分成若干个环带，在保证每个环带面型的前提下，把它们压缩到一个平面上，构成一个类似锯齿型的聚光透镜。

菲涅耳透镜体积小，重量轻，宜于大批生产，成本低。因此，应用日益广泛，而且功能不断扩大。例如用菲涅耳透镜代替图 4—88 中的场镜的取景器的光学结构示意图及成像关系如图 4—90 所示，这只是菲涅耳透镜诸多应用中的一例。

7. 影像分离楔形镜对焦装置有什么特点？

图 4—91 所示为分离楔形镜对焦装置原理图。A 和 B 是设在毛玻璃平面上的一双方向相反的楔形镜，图中 A 镜靠前，B 镜靠后，它们的斜面在毛玻璃所在的平面内相交。如果被拍照的物体是一条垂直纸面的直线，由于调焦情况不同，观察到物镜所成的像也不同。

当被物镜所成的像准确地调焦在毛玻璃面上，眼睛看到的是一条完整的直线，这时进行拍照即可获得清晰影像。如图 4—91(b)所示，这时直线像 S 刚好跟两个楔形镜斜面的交点是重合的。

在调焦不足时，直线通过物镜成像于 S，S 做为物通过两个楔形镜分别成虚像于 S' 与 S''，S' 为 A 镜成的像相对于 S 而言偏于左方，S'' 为

B 镜成的像偏于 S 的右方。眼睛观察时，这条直线被分为两部分，两部分之间的距离为 $S_1 S_2$ ，如图 4—91(a)所示。

当调焦过头时，如图 4 - 91(c)所示，直线被 A、B 所成的像也是分离的。因此，如果眼睛所看到的物体是完整的连续的，则认为调焦是准确的。

影像分离楔形镜调焦的调焦精度是比较高的，它是现代相机中采用的调焦装置之一。除此之外，微棱镜的对焦装置也是一种精确调焦装置。

8．什么叫微棱镜对焦装置？

在取景毛玻璃中心部位放置多个微小棱镜锥，构成微型角锥对焦器。使用时，景物成像在毛玻璃面上，角锥部分影像清晰，景物成像离开毛玻璃面时，角锥部位影像迅速模糊。

微型角锥有三面体，如图 4—92 所示，此外还有四面体、六面体等。取景器的种类很多，其它取景器这里就不一一介绍了。

第十六节 滤光镜的滤光原理是什么？有多少种？

一、滤光镜的滤光原理是什么？

滤光镜是摄影中不可缺少的光学器件，它能按照规定的需要改变入射光的光谱强度分布或使其偏振状态发生变化。就光学行为而言，主要是透射、反射、偏振和密度衰减、散射等。图 4—93 所示是光通过滤光片时反射和透射的示意图。

实际在滤光镜两个表面处都同时发生透射和反射。从能量角度看，常以反射率、透射率及吸收率表示能量的分配状况，根据不同的需要令它们有不同的分配情况。滤光镜的材料吸收的辐射通常是以热、荧光或在材料中进行的光化学反应的形式释放出来。

二、滤光镜有多少种？

滤光镜的种类很多，而且可以从不同的角度来分，从用途方面可分为黑白摄影专用滤光镜、彩色摄影专用滤光镜、彩色、黑白摄影中通用的滤光镜及特殊效果滤光镜等。

1. 黑白摄影专用滤光镜有几种？

黑白摄影专用滤光镜从形态上区分有色胶膜滤光镜、玻璃粘合色胶膜滤光镜和玻璃滤光镜等。

色胶膜滤光镜是把染料混合到精胶之中制成的透明色胶膜，一般多是方形，用时加在镜头前面。其优点是：因胶膜薄、对镜头的焦点影响很小；颜色种类多；透明度高；价廉等。其缺点是：容易落上尘土和沾染指纹；不易擦试；温度高时易腿色；怕潮湿；如果使用时间长，胶膜会变硬而裂碎等。

玻璃粘合色胶膜滤光镜是将有颜色的胶膜粘在两层玻璃中间。其优点是：颜色深浅的等级多；透明度高；它比色胶膜滤光镜坚固；易于擦试。其缺点是：厚度大，如果玻璃磨制不精，对镜头的焦点可能会有影响；在受潮和震动时，镜边容易开胶，胶膜有斑点和起皱纹。

色玻璃滤光镜是由基质玻璃加着色剂构成的。可分为两大类：胶体着色玻璃和离子着色玻璃。典型的基质玻璃是钾、钠、磷酸盐、硼酸盐、硼硅酸盐和硅酸盐玻璃。着色剂可以取金属离子掺在基质玻璃的溶液之中，例如二价和三价金属离子锰、铬、钒，二价铜或一价铜离子、钴、镍、铀、钨、钼、铋、镨离子。它们也可以由非金属元素或非金属元素的化合物即硫、硫化物、硒、硒化物、碲或磷化物以及金属原子如金、银、铜原子悬浮于玻璃之中，构成亚微观晶体，仅经过一个特殊的热处理达到其有效大小。滤光镜玻璃的光谱特性不但依赖于着色剂和所采用的基质玻璃组合，同时也取决于炼玻璃炉子的气氛。在压铸玻璃的情况下，还取决于连续热处理的温度和持续时间。

色玻璃滤光镜因它是用有颜色的玻璃磨制而成，所以比玻璃粘合色胶膜滤光镜薄。它对颜色的通过和吸收能力也比较强。不容易受潮气影响，也不易褪色。但它的颜色等级不如色胶膜多。

黑白摄影专用滤光镜从颜色上可分为如下几类。

黄滤光镜，能通过黄、橙、红、绿等色，吸收蓝、紫二色。在光谱上通过的部位约由 500 至 700 纳米，600 纳米的黄色部分通过量多。黄滤光镜按颜色深浅又可分为深黄、中黄和浅黄等几种。

橙色滤光镜，能通过黄、橙、红诸色，吸收蓝、紫和少量绿光。在光谱上通过的部位由 560 ~ 700 纳米。

红橙滤光镜，能通过黄、橙、红诸色，吸收蓝、紫和相当多的绿。光谱上通过的部位由 590 ~ 700 纳米。

红滤光镜，能通过红、橙、黄三色，红色通过量最多，吸收绿、青、蓝、紫。在光谱上通过的部位约由 600 到 700 纳米。

绿滤光镜，通过黄、绿二色，绿色通过量最多，吸收紫、蓝、红三色，也能吸收大部分橙色。在光谱上通过的部位约由 500 ~ 600 纳米。

蓝滤光镜，能通过的光为蓝、青、紫三色，蓝色通过量多，吸收黄、橙、红及紫红诸色。在光谱上通过的部位约由 380 ~ 500 纳米。

天空滤光镜，镜面上一半为黄色，一半无色，使用时，把黄色部分放在上面，用于吸收天空紫光，其无色部分可使地面景物的光线完全通过。用这种滤光镜拍摄风景时，不用增加曝光时间。

黑白摄影专用滤光镜也可从颜色深浅来区分，各种滤光镜在颜色上均有深浅之分。滤光镜颜色的深浅，影响色光的通过和吸收能力。通常是色愈深通过量愈少。

2. 黑白滤光镜有什么作用？

滤光镜对各色光都起着通过、限制和阻止等方面的作用。色光通过量多时，照片就成了明亮的色调；色光通过量少时，则照片上就形成深暗的色调；若光线完全被阻止，胶片上没有感光，此处照片色调是暗黑色的。其具体作用如下所述。

校正颜色的作用

我们知道不同波长的光对人眼的视觉灵敏度是不同的，通常人眼对黄绿光最灵敏，对蓝紫光最不灵敏。但感光底片却对蓝、紫光最敏感，而对黄绿光较迟钝。因此照片所纪录的光谱颜色的黑白影调与人眼所见到的色调有差别。例如照片所记录的蓝色天空比人眼所看到的蓝天空更为明亮，几乎成为白的调子，而绿树则比人眼所见的更为深暗。为了真实地再现自然景物的色调，需要在拍摄时对光进行校正。校正的方法常采用适当的滤光镜。如拍摄天空彩云时可加黄滤光镜（吸收蓝和紫光），使天空色调压低，云彩显现出来。一般说来，天空越蓝，使用滤光镜的颜色越浅；天空颜色越淡，使用滤光镜的颜色越深；如果天空呈现灰白色时，则滤光镜不起作用。

调节空气透视

由于空气中充满着大量的空气介质，这些介质对蓝、紫短波光散射作用大。这种作用跟空气介质层厚度有关，空气介质层愈厚，散射的蓝、紫光愈多，颜色愈清淡，影纹愈不清，色调愈明亮。因此，近处景物颜色鲜艳，影纹清晰，色调正常；远处景物颜色清淡，影纹不清，色调明亮。这种现象叫做空气透视现象。在照片中再现出自然界中的空气透视现象，有助于表现景物的空间深度感。在实际拍摄中，常常需要靠滤光镜来调节空气透视。当远景物影调太淡时，为了增强远景的清晰度，可用黄、橙或 UV 镜；当远景物影调深，影像过于清晰，空气透视感不强

时，可使用蓝、青滤光镜或雾镜。

调整反差，突出主体

在画面中，利用色调对比可以达到突出主体的目的。当主体与背景色调不容易明显区分时，可加用与主体颜色相同的滤光镜，使照片中主体色调明亮，故可与背景相区分。比如拍摄红花绿叶时，如不加滤光镜，照片上的红花与绿叶都是暗灰色。加用红滤光镜时，照片上的红花明亮，绿叶深暗，两者区分出来。另外也可利用滤光镜调整画面的反差，使用深黄、橙、红滤光镜，能增加画面的反差；使用青、蓝、灰滤光镜以及柔光镜、雾镜，都能降低画面的反差。

用于翻拍取消颜色

在翻拍文件、图表、书画时，有时原稿上会有带颜色的格子、线条、污迹等，若想在翻拍过程中取消这种带颜色的污迹，可以使用与污迹颜色相同颜色的滤光镜，这样拍出的照片，污迹会消失。如果想得到相反效果，可以使用相补颜色的滤光镜。如文件上的字迹是蓝色，翻拍后字迹不清，加用红色或橙色滤光镜时，字迹会显得非常清晰。

3. 曝光补偿的依据有哪些？

在摄影时，在镜头前加用了滤光镜，因为滤光镜吸收了一部分光线，所以在感光时必须增加适当的曝光量，才能获得正确的曝光。因增加滤光镜而增加感光的倍数，叫做滤光镜的因数或倍数。由下列条件决定曝光因数的大小：

滤光镜的颜色与因数的关系

滤光镜的颜色不同，通过和吸收光线的数量不同，例如黄滤光镜只吸收光谱上的紫、蓝光，其它色光都能通过，感受波长的范围比较宽，故因数小，即增加曝光的倍数小。再如，红、绿滤光镜，除能吸收紫、蓝光外，还吸收其它色光、感受波长的范围变窄，所以因数大，即增加曝光的倍数就大。故而滤光镜的颜色对其因数影响很大。

感光片的感色性能与因数的关系

全色片能感受光谱上的全部可见光颜色，使用黄滤光镜时，由于它只能吸收蓝、紫光，故光能损失不多感光倍数增加的小；用色盲片摄影时，还是使用同样的黄滤光镜，因色盲片只能感受光谱上的蓝、紫光，而黄滤光镜又吸收蓝紫光，因而光能损失的就多，感光增加的倍数就大。通常是使用色盲片时不加滤光镜。例如一个中黄滤光镜，对全色片因数是2，对分色片因数是2.5，对色盲片因数为20。

滤光镜颜色的深浅与因数的关系

因为滤光镜颜色的深浅直接影响着通光能力的大小，颜色愈深吸收的光能量愈多，滤光镜的因数就大；颜色浅吸收的能量就少，通过量多，滤光镜的因数小。此外，滤光镜与被摄体颜色相同时，因数小，与被摄体颜色不同时，因数大。

与光源的色成分的关系

以自然光为例，在中午左右是白色，紫、蓝光较多，如果这时使用专吸收紫、蓝光的黄滤光镜感光因数就大。在清晨和傍晚时，大部分是黄橙色，所以滤光镜的因数小。黄、红滤光镜在日光下因素大，在偏橙色灯光下因数小，这是灯光中含黄、橙光成分多，含蓝、紫光成分少的缘故。

4. 如何计算曝光补偿因数？

在摄影时，加用滤光镜后必须增加适当的曝光量。使用时只要把曝光时间乘以滤光镜的因数所得的商数即是加用滤光镜后所需要的曝光时间。例如原来曝光时间是光圈 16，1/100 秒，如果加用因数为 2 的滤光镜后，曝光时间为光圈 16， $1/100 \text{ 秒} \times 2 = 1/50 \text{ 秒}$ 。

5. 滤光镜因数的测定方法有几种？

滤光镜出厂时都附有因数表，它是在标准光线下（如中午的日光、标准钨丝灯的灯光）测定的。如果滤光镜没有附带因数表时，可用下列的方法来测定。

密度对比测定

在实际工作条件下，选择一个中性灰的被摄体，在未加滤光镜前作一次正常曝光，然后加用滤光镜按 1/2 档光圈快门逐级增加到 2~4 档，或更大的曝光量范围，作一系列曝光。用目测或用密度计，将没有使用滤光镜的画面的密度跟加用滤光镜的一系列密度相比较，从两张相同密度的画面中计算出滤光镜的因数。

实拍测定

先用原有的速度、光圈拍一张，加滤光镜后开大一级拍一张，开大两级拍一张，开大三级拍一张。那一级的密度与原画面密度相同时，那一级就是滤光镜的因数。当开大一级合适，因数为 2；开大两级合适，因数为 4；开大三级合适，因数就是 8。

直接计量测定

把滤光镜贴在曝光表的遮光栏上直接测量。例如未加滤光镜时，量出的光值是 100，贴上滤光镜后，光值为 50，则滤光镜的因数就是 2。

三、彩色摄影专用滤光镜有几种？

在彩色摄影中，要求彩色照片能逼真地反映客观景物的颜色，而彩色感光材料在控制色彩平衡方面，要同时适用不同光源的光谱功率分布是比较困难的，因此彩色感光材料从乳剂的制造上分为三类：适用于日光的光谱成分，叫做日光型彩色感光材料；适应于摄影灯光的光谱成分叫做灯光型感光材料；适用于日光与灯光的通用感光材料。

日光型彩色片的平衡色温是 5500K，在这个色温下拍照景物的色彩才能被正确地反映出来。当色温低于平衡色温时摄影，景物会被记录成偏橙、红的影调；在高于平衡色温下摄影，景物会被记录成偏青、蓝的影调。

灯光型彩色片的平衡色温是 3200K，当光源的色温高于 3200K 时，景物会被记录成偏青、蓝的影调。

日光灯型通用彩色片，可在日光或灯光下使用，不用校正光源色温。总之，上述几种彩色感光材料只要在正确色温（平衡色温）情况下，如果不想达到特殊效果时，都不用使用滤光镜。但是，在光源色温有了变化，如日光型片在灯光下使用，灯光型片在日光下使用，都需加用滤光镜来校正色光。有时拍摄时，光线中呈现出不必要的过多的某种颜色时，也要加用滤光镜来校正。

彩色摄影使用的滤光镜，可分为四类：胶片换型滤光镜，光线平衡

滤光镜，颜色补偿滤光镜和闪光灯前用滤光镜。下面分别具体介绍一下它们各自的特点。

1. 胶片换型滤光镜有什么特点？

各种类型的胶片都有自己特定的平衡色温，只有光源色温与彩色片的色温平衡时，被摄体的色彩才能得到正确的表达。但是，当日光型片在灯光下使用或灯光型片在日光下使用，光源的色温与彩色片的色温就不能平衡，这种不平衡就需要使用校色温的滤光镜加以校正。灯光日光型通用彩色负片，拍摄时可不加用滤光镜，在放大时再校正它的偏色情况。

彩色摄影用的换型滤光镜有两种：琥珀色，供灯光片在日光下使用；淡蓝色，供日光片在灯光下拍摄使用。

2. 光线平衡滤光镜有什么特点？

光线平衡滤光镜能将光线中过多的一些红色或蓝色的光线吸收掉。因为日光色温变化很大：清晨和傍晚日光色温较低，偏红橙色；阴天或树荫下，又会偏蓝紫色。用滤光镜可以校正不平衡色光。在光线偏蓝时，用一个“暖色调”滤光镜，吸收过多的蓝色光线。当光线偏红橙色，可用一个“冷调”滤光镜，吸收过多的红色光线。

光线平衡滤光镜分两种：冷调（蓝色）用来提高少量色温。例如使用灯光 B 型片（3200K）在普通家庭用的 100 瓦灯泡下拍摄，灯光色温是 2900K，光源色温略低于胶片色温。拍摄时加用冷调滤光镜可提高色温，可以达到与胶片色温相平衡的效果。暖调（琥珀色）滤光镜可以降低色温。例如还是用灯光 B 型片（3200K）在摄影灯（3400K）下拍摄时，光源色温略高于胶片色温。拍摄时加用暖调滤光镜来降低光源色温，达到跟胶片色温平衡。这种滤光镜可以两块同时使用，但暖调与冷调滤光镜不能混合在一起用。

3. 颜色补偿滤光镜有什么特点？

颜色补偿滤光镜的作用是什么？

颜色补偿滤光镜是用以改变彩色片的总的彩色效果，或者用以校正拍摄时色彩不理想的情况。如：

(a) 因为彩色片在制作时的缺点，或因存放过久、贮存不得当而出现色彩不平衡的情况，拍摄时要加用滤光镜进行色彩补偿。

(b) 彩色片因长时间曝光而引起倒易律失效时，也需要用滤光镜来补偿色彩不平衡的情况。

(c) 在水下进行彩色摄影时，因水能吸收色光，故而需要用滤光镜加以补偿。

(d) 相机镜头质量也能影响色彩平衡的状况。例如有的镜头拍出的照片会偏暖，又有的镜头拍出的照片会偏冷，这也需要加用一定的滤光镜来加以补偿。

颜色补偿滤光镜怎么表示？（以 CC-05Y 为例）

(a) 颜色补偿滤光镜用 C·C 代表，滤光镜的密度标志用两个数字表示，最后的字母表示滤光镜的颜色：C 代表青、M 代表品红、Y 代表黄。

(b) 彩色印相滤光镜（精胶的）

这种滤光片是专供彩色底片在彩色相纸上印放使用的。它与柯达 C·C 滤光镜相同，简称 C·P。这种滤光片是设计用于光源和底片之间的，因

而胶片是适合放大机框架尺寸。例如“CP05R”滤光片，其中C·P是滤光片简称，数字05表示滤光片的密度，最后字母表示滤光片的颜色（R为红色）。

4. 闪光灯前用的彩色滤光片有什么特点？

闪光灯前用的彩色滤光片是一套专门闪光灯使用的彩色滤光片。拍摄前，将滤光片插在闪光灯前，它能改变闪光灯的色成分而实现滤光的目的。它跟加在镜头前的滤光镜同样起到滤光效果。

闪光灯前用的彩色滤光片适用于拍摄黑白片与彩色片。

拍摄黑白片时，它能调节景物的反差。例如在拍摄红花绿叶的照片时，不用滤光片时，闪光灯就平均照明，红花和绿叶就会在黑白片上显出相似的灰调，而不容易区分出；如在灯前用了红滤光片，红花色调变淡，绿叶变深，红花与绿叶能在画面上区分出来。当加绿滤光片时，红花色调变深，绿叶变淡，也能达到同样的效果。

在彩色摄影中，这种滤光镜能改变闪光灯的色光成分。例如闪光灯适合于彩色日光片，这是由于万次闪光灯的色温跟日光片的色温是平衡的。但是用闪光灯拍摄，而用的是彩色灯光片，两者的色温不平衡，可以在闪光灯前加用85B滤光镜。这种滤光镜是琥珀色的，可降低闪光灯的色温而使两者的色温相平衡。

使用闪光灯滤光片时，要有一个插座。先把插座装在闪光灯灯头前，插座两侧有两条槽子，可将滤光片插在槽中，能同时插入两片滤光片。它的优点是，它不受镜头口径尺寸的限制，一支灯可以适用于各种口径的相机；另外，在拍摄时，能闪出各种需要的色彩效果。

以下是几种常见的闪光灯前用的彩色滤光片。

红、蓝、绿、黄滤光片

红、蓝、绿、黄滤光片可以单独使用或两块同时使用。两块同时使用时，会形成另一种综合色：

蓝 + 黄 = 绿；
蓝 + 绿 = 青；
红 + 绿 = 琥珀；
蓝 + 红 = 品红；

85B 色温转换滤光片

使用灯光型彩色片在以电子闪光灯作光源时，要用这种滤光片。

ND4 中灰滤光片

在用快片拍摄特写时，有时需要减弱闪光灯的光量，这时可以使用ND4中灰滤光片。它的作用可降低闪光灯两档光量。

DIF 漫射镜

因为漫射镜能使闪光灯的光线沿着不同的方向漫射，而使光线柔和。

U·V 紫外滤光片

在拍摄高速彩色片时，画面上常常会出现轻微的蓝色，是由于闪光灯或日光中紫外线对胶片造成的影响。加用这种滤光镜就能消除上述影响。

在进行多次曝光时，每曝一次光换一种滤光片；或同时用几个闪光灯，每个闪光灯前都加用不同颜色的滤光片，都可以拍出色彩缤纷的特

殊效果。

四、彩色、黑白摄影中通用的滤光镜有几种？

彩色、黑白摄影常见的通用滤光镜有下列四种：偏振镜、紫外滤光镜、中性灰滤光镜、柔光镜，下面分别进行一下介绍它们。

1. 偏振镜有什么特点？

偏振镜是利用偏振作用对光进行选择控制的。它是用两层玻璃粘合，中间夹上一层胶膜，胶膜中包含有极细的杆状结晶，均按顺丝排列而成。如果光线光波振动的方向跟镜中细丝方向相同时，光波能通过；如光波振动方向与细丝方向垂直时产生消光（光不能通过）；如果光波振动方向跟细丝的方向即不平行也不垂直时，光波就部分的通过。使用时，把偏振镜放在镜头前，通过取景器边看边转动镜面可看到：最亮（光振动方向与细丝方向相同）、渐暗（光振动方向与细丝方向成一定角度）、最暗（光振动方向垂直于细丝方向）。

偏振镜有什么用途？

(a)消除或减弱反光

在拍摄玻璃器皿、光滑的金属制品、塑料面、水面、油漆表面等表面光滑的物体时，常会见到由于光的偏振造成的耀斑或反光。拍摄时使用偏振镜就可消除或减弱被摄体表面的亮斑或反光，表现出被摄体表面的细部。

(b)使蓝天变暗

我们由第一章中大气的散射作用知道：来自天空中跟阳光投射方向成直角方位的天空散射光，具有偏振光的性能，而在其临近天空具有部分偏振光性能。用偏振镜并调节镜中细丝方向跟天空偏振光振动方向间的角度，可改变天空的亮度：两者成 90° 时，天空光受阻而变暗；两者平行时，偏振镜不起作用；两者夹角在 $90^\circ \sim 0^\circ$ 之间时，天空光受阻逐渐减小直到为零。

偏振镜是灰色的，因此它在调节天空亮度时，并不影响被摄对象的彩色还原，所以它适合于彩色摄影中用来控制天空色调。

(c)用做中性灰密度镜

两片偏振镜相叠，可起到中性灰滤光镜的作用。使用时，转动两偏振光轴的夹角，可成为可变中性灰阻光片。

(d)提高彩色影像的饱和度

物体表面单向反射形成亮斑，会明显地降低彩色影像的饱和度，采用偏振镜，可以减弱或消除偏振光，可以不同程度地改善影像饱和度。

怎样计算偏振镜的因数？

由于偏振镜内胶膜中细杆状的结晶丝在制作方法上的不同，阻光程度（或透明度）有别，故应在曝光上增加的倍数（即因数）各异。一般感光增加的倍数约为 $2 \sim 4$ 。偏振镜因数的计算方法是曝光时间乘以偏振镜的因数，所得的商数便是加用偏振镜所应使用的曝光时间。如果偏振镜与滤光镜合用时，两者的因数之积就是应增加的感光倍数。

使用偏振镜应注意什么？

(a)不要使光线直射到偏振镜面（为避免产生光晕）：

(b)偏振镜的阻光程度决定于光线的振动方向跟镜中细丝方向间的夹角，所以使用偏振镜时，必须不断转动镜面才能获得最好的效果。因此，用单镜头反光照相机比较方便。若用双镜头反光式或连动测距器相机，首先得将偏振镜放在取景器前，通过目视找到合适的位置，然后要保证不移动调好的方向，将偏振镜加在镜头前，在未加偏振镜前就得调好焦。事前就得约定好画面是横幅或竖幅，拍摄时不能颠倒，不然的话偏振镜就会不起作用。

(c)在灯光下对物体拍摄或翻拍画片时，可在光源前加偏振板，但不能加镜头使用的偏振镜；同样偏振板也不可加在镜头前，两者不能通用。

2. 紫外滤光镜有什么特点？

紫外滤光镜简称U·V滤光镜，多数是无色的，也有略带微黄和微红色的。无色紫外滤光镜光能损失少，感光时可不增加曝光量。微黄色紫外滤光镜的因数约为1.5。紫外滤光镜专为吸收紫外线用。

拍摄开阔的远景、航空摄影、高山摄影等，由于远处的紫外线使得远处的景物常常是过亮，且朦胧不清，特别是拍彩色片时，远景还会蒙上一层蓝紫色。如果拍摄时加用紫外滤光镜，可以滤掉紫外光，拍摄出的结果，远景清晰，色彩也真实。

3. 中性灰滤光镜有什么特点？

中性灰滤光镜是一种不带任何色彩成分的灰色玻璃，有一定的光学密度。不同密度的中灰滤光镜，颜色深浅不同。它具有减少光通量的作用，使用快片，在强光下拍摄时，为减小被摄体的亮度，要加中性灰滤光镜。根据曝光量公式 $H = E \cdot T$ （ H 为曝光量， E 像面照度， T 曝光时间）可知，如在室外拍摄，要控制景深，使背景模糊来突出主体，拍摄时要用大光圈，像面照度 E （单位面积上光通量）必然很大，即使用最高快门速度（ T 小），但曝光量 H 仍然很大，即会产生感光过度，只有加用中灰镜来校正曝光过度。

在拍摄动体时，为了表现动感，就要较慢的快门速度（ T 很大），尽管收小光圈（ E 小），但曝光量 H 还是很大——曝光过度，也需要使用中灰滤光镜来校正曝光过度。

4. 柔光镜有什么特点？

普通镜头配合柔光镜与不带附件的柔光镜头都能拍出柔光效果的影像。

柔光镜头有什么特点？

(a)什么叫柔光镜头？

柔光镜头也叫软焦点镜头或散焦点镜头，是一种不用柔光镜或纱布等附件就可直接拍出柔光效果的镜头，柔光镜头多用于拍摄人物肖像、可使面部的皱纹，斑点、凹坑、小疙瘩等在所摄底片上变得不明显，甚至消失，因而柔光镜头也叫做肖像镜头。日本摄影家高桥扶臣男擅长应用柔光镜头拍摄花卉，他的经验认为，拍摄时要注意把焦点对准花蕊，并且根据被摄体和光线条件确定柔光量，在不同的天气或光线条件下，柔光效果是不同的。在晴天强烈的顺光条件下，被摄体的明暗反差大，高光部位光渗现象明显，柔光效果好，在反差低的阴天或背阴处的漫射光条件下，用柔光镜头拍出的花卉更加素雅。用柔光镜拍摄花卉时，光圈可以掌握在最大口径再收缩2~3档的范围。当拍摄较大型花卉时，光

圈可以放宽至最大口径再收缩 1~2 档。

(b)柔焦(光)镜头有几种?

按柔焦原理可分为两种。第一种是在镜头的光路中,装有一与主轴垂直的多孔金属片,成像光线经这些小孔时可产生扩散现象,从而使胶片上的影像呈现出柔光效果。此种镜头柔光效果的强弱可由光圈的大小进行控制,当光圈调至最小时,可做正常摄影镜头用。第二种如米诺尔它 85mm、f/2.8VARISOFT 摄影镜头,此镜头上有一柔焦调节环,分四档:0 档无柔焦效果,供正常摄影用;1~3 档,柔焦效果逐渐明显。当自 0 至 3 调节柔焦调节环时,该镜头逐渐产生愈来愈大的人为球差,从而使摄得的底片产生柔焦效果。

柔光镜有什么特点?

柔光镜是无色的,它是在透明玻璃上刻有疏密不同的圆形波纹,或是不规则的不平的玻璃面,也有的柔光镜是由许多小的透镜组成。柔光镜的作用是将透过镜头的光线进行部分折射,使结像的线条变得柔和,但焦点仍然清晰,以达到柔化影像的作用。

加用柔光镜后,因为通过镜头的光线被细微地折射、分散或阻挡,所以曝光时间要有所增加,柔光镜分 1、2、3 号,号数愈大,效果愈显著。

使用柔光镜时,在加镜前对焦,对焦后,再加柔光镜。

要想加强柔光效果时,可加用两片柔光镜,柔光镜也可以与其它彩色滤光镜或灰镜同时使用。

五、特殊效果的滤光镜有什么特点?

为了获得一些特殊的摄影效果,就必须配备不同的特殊滤光镜,特殊滤光镜的种类很多,这里只介绍下列几种。

1. 多影镜有什么特点?

多影镜有什么特点?

多影镜是极精确地把光学玻璃切割成不同的多面体,多面体中的每一个面都能对同一被摄物成一个像,所以多面体中有几个面就成几个像。摄影镜头加上多影镜后就构成了一个联合光具组,多影镜的像就是摄影镜头的物,故多影镜有几个面,摄影镜头就成几个像。

多影镜有几种?

多影镜常见的有下列三种。

(a)三平行面以 3PF 表示,可拍摄成三个平行影像;三棱面以 3F 表示可拍成三个不平行的影像;五棱面以 5F 表示,可拍成五个影像;六棱面以 6F 表示,可拍成六个影像;六平行面以 6PF 表示,可拍成一个影像,后面相随着五个重复的影像,上述几种多影镜的光学结构如图 4—94 所示。

(b)可变多影镜

这种多影镜是由两块(或两片)两面棱镜组成,使用时可转动镜片,当两片两面棱镜平行时,能把一个被摄体拍成两个影像;当两片两面棱镜垂直时,就能摄成四个影像。

(c)彩色多影镜

这种多影镜常见的有两种形式。一种是镜面被切割成三角形，每个三角形呈现一种颜色，有红、绿、蓝三色，拍出照片亦成红、绿、蓝三种颜色；另一种是镜面被切割成五面镜，两种颜色，一半橙，一半绿，一个被摄体被拍五个影像，两种颜色。

用多影镜拍摄时应注意哪些问题？

用多影镜拍摄时应注意如下问题。

(a)我们知道，光圈的大小直接影响视场的大小，光圈越大，视场愈大，反之亦然。也就是说光圈越大，多影镜中各个面成的像亦大，因此，各个像重叠干扰就多，反之亦然。一般多采用中间口径光圈。

(b)由式(2-12)，横向放大率公式 $\beta = \frac{S'}{S}$ （ S' 为像距， S 为物距），可知被摄体距镜头距离远近对影像有影响。距离近时，因成像大，影像多重叠；距离远时，因成像小，影像重叠少。

(c)拍摄时要选用暗背景、白背景或简单背景。背景复杂时，会使画面零乱。

(d)使用广角镜头拍摄时，多影镜拍出的多影像相距比较近；使用望远镜头拍摄时，多影像之间的距离比较远。

(e)由于原来的光线被分成几份独立成像的光束，照度有所下降，拍摄时可根据多影镜的数量，酌情增加些感光时间。

(f)使用多影镜时，可同时加用滤光镜，先把滤光镜装在镜头上，再将多影镜放在滤光镜前面。

(g)使用多影镜必须采用单镜头反光照相机，以便在取景器上直接观察画面效果。

2. 光芒镜有什么特点？

光芒镜有什么特点？

它能使画面的光亮部分出现闪光，尤其是画面中的灯光或点状光斑，都会出现光芒四射的闪光效果。

拍摄时，最好选用暗背景，使用的光圈口径对光芒闪烁效果的影响是：光圈愈大，效果愈显著；光圈愈小，效果愈不明显。

光芒镜有几种？

常见的光芒镜有如下几种。

(a)十字镜

这种滤光镜是在无色的光学玻璃上刻有整齐的方格，每个方格的四个顶点处都是十字形。当光线通过十字时，由于漫射作用，就会形成闪烁的十字光芒影像。在拍摄妇女肖像时加用十字镜，项链、耳环、手表等都会出现特殊的光芒四射的效果。

(b)六星镜

这种滤光镜是在无色玻璃上刻有六角形图案，也有人将它叫作雪花镜。这种滤光镜用来拍摄强光点时，可形成星状光芒。

(c)八星镜

这种滤光镜是在无色透明玻璃上刻有米字形图案，故而也叫米字镜。使用这种滤光镜拍摄强光点时，可形八线星状光芒。

(d)可变十字镜

这种滤光镜是用两片各刻有线纹的无色光学玻璃组成，使用时转动

一块镜片时，能获得不同形式的散射光芒。

六、滤光镜的成像原理是什么？

各种滤光镜都可以看做是平行平板，就连多影镜的每一个面也可以看作平行平板，甚至于光芒镜的刻痕部分（从微观上看）也可以认为是由微小的平行平面元组成的。因此，平行平板的成像原理就是滤光镜的成像原理。为了说明问题，特意将平行平板画得很厚，如图 4—95(a)所示，从 P 点发出的光线 pd 射入一个与光轴垂直放置的平行板，经第一面折射后射向第二个面，成像于 P₁ 经第二面折射后沿 EB 方向射出，出射光线的延长线与光轴交于 P₂ 点，则 P₂ 点就是 P 点经平行平板后，所成的虚像点。可以证明出射光 EB 平行于入射光线 PD，也就是说像点 P₂ 相对物点 P 有一位移量，以 Δl 表示。在近轴条件下

$$\Delta l = d \left(1 - \frac{1}{n} \right) \quad (4-38)$$

可见其轴向位移量只与平板的厚度 d 及其折射率有关，与入射角无关；但在非近轴条件下，它与入射角有关。图 4—95(b)所示为一会聚光束本来交于 P 点，由于插入了平行平板，使会聚点移到 P' 点。在近轴条件下，位移量可用式 (4—38) 计算。

将各种附加镜看为平行平板时，当其厚度不能忽略时，光线通过它产生的轴向偏移对摄影时的实际物距或像距有影响（影响成像质量）。例如在微距摄影中，要在摄影镜头前端加用滤光镜拍摄时，由于物距小，附加镜的位移量就不能忽视，应加上滤光镜后再调焦*。使用普通摄影镜头拍摄时，一般不宜把滤光镜安置在摄影镜头后端拍摄*。有些长焦距摄影镜头备有后、置滤光镜，因为在设计时已对滤光镜产生的光线位移作了补偿，所以摄影时不可以一片滤光镜不加（只少要加 UV 镜），或同时加几片，或随意用其它滤光镜代用。

第十七节 摄影与力学有关系吗？

在摄影过程中涉及到力学的地方是很多的，例如相机后盖的开与关、胶片的装与卸、胶片的传递、选择光圈过程、调焦过程、按快门过程等。我们只分析搬把卷片机构的力学问题。

一、搬把转片机构的构造

图 4 - 96 所示为搬把卷片机构的机械结构图。这种结构广泛用于 135 照相机上。从力学角度可以认为它是由三个刚体组成：
1. 刚体 A 是由搬把、传动轴、传动齿轮 3 组成；
2. 传动轮 4 为刚体 B；
3. 刚体 C 是由传动轮 5 与八牙轮组成。
另外还包括卷片筒 7、摩擦簧 8、复位弹簧 9 等组成部分。

二、刚体 A、B、C 的受力分析

如示意图 4—97 所示，为简单起见，各传动轮只画出一个齿来说明问题。

1. 刚体 A 受两个力作用：手对搬把的作用力为 F_{A1} 、传动轮 4 与传动轮 3 啮合对刚体 A 的作用力为 F_{A2} 。

2. 刚体 B 也受到两个力的作用：A 对 B 的作用力为 F_{B1} 、C 对 B 的作用力为 F_{B2} 。 F_{B1} 与 F_{A2} 是一对大小相等、方向相反作用在两个不同刚体上的作用力与反作用力。

3. 刚体 C 受力情况：B 对 C 的作用力为 F_{C1} 、胶片对 C 的作用力为 F_{C2} 。 F_{C1} 与 F_{B2} 也是一对作用力与反作用力。

三、刚体转动定律

1. 力矩

要使物体（刚体）定轴转动，其效果不仅与作用力的大小和方向有关，还跟力臂有关（刚体轴到力的作用线的垂直距离）。力与力臂的积叫做力矩为

$$M = F \cdot r \quad (4-39)$$

其中 M 为力矩、F 为作用力、r 为力臂。

2. 刚体转动定律

刚体转动定律表示式为

$$\sum M = J\beta \quad (4-40)$$

式中 $\sum M$ 为作用在刚体上的合力矩，力矩有正负。例如图中的刚体 A，受到两个力矩的作用：若设顺时针方向的力矩为正、逆时针方向力矩就为负，则 A 受到的合力矩为：

$$\sum M = F_{A2} \cdot r_{A2} - F_{A1} \cdot r_{A1} \quad (4-41)$$

J 为刚体转动惯量、 α 为刚体角加速度。刚体转动定律与质点平动时牛顿第二定律 ($F = ma$) 相对应 ($M = J\alpha$, $J = m \cdot r^2$, $\alpha = a/r$)。作用在刚体上的力矩除了与力的大小及力臂的大小有关外, 还跟力的方向有关 (决定力矩的正负)。当刚体匀速转动时, 角加速度为零, 则合力矩为零。

3. 作用在刚体 A、B、C 上的力矩

当刚体匀速转动时 ($\alpha = 0$):

作用在刚体 A 上的力矩

由 (4-41) 式可知:

$$F_{A2} \cdot r_{A2} - F_{A1} \cdot r_{A1} = 0$$

$$F_{A2} \cdot r_{A2} = F_{A1} \cdot r_{A1}$$

$$\frac{F_{A1}}{F_{A2}} = \frac{r_{A2}}{r_{A1}}$$

可见, 力与力臂成反比, 力臂大就可以省力, 这就是搬把为什么要加长的原因。

作用在刚体 B 上的力矩

由式 (4-39) 与式 (4-40) 则:

$$F_{B1} \cdot r_{B1} = F_{B2} \cdot r_{B2}$$

$$r_{B1} = r_{B2}$$

$$F_{B1} = F_{B2}$$

作用在刚体 C 上的力矩

$$F_{C1} \cdot r_{C1} = F_{C2} \cdot r_{C2}$$

因为八牙轮的半径大于传动轮 5 的半径 ($r_{C2} > r_{C1}$), 所以 $F_{C2} < F_{C1}$ 。

四、齿轮传动中转速与齿数的关系

齿轮传动时, 在同一时间内两个齿轮通过啮合处的齿数相等。根据这个特点, 我们就可以求出两个齿轮每分钟的转数和它们的齿数的关系。

设齿轮 1 有 z_1 个齿, 每分钟转 n_1 次; 齿轮 2 有 z_2 个齿, 每分钟转 n_2 次。所以, 每一分钟内, 齿轮 1 经过啮合处的齿数等于 $z_1 n_1$, 齿轮 2 经过啮合处的齿数等于 $z_2 n_2$, 它们经过齿口处的齿数应相等, 即:

$$z_1 n_1 = z_2 n_2$$

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{z_1}{z_2} \quad (4-42)$$

两个啮合的齿轮的每分钟转数与它们的齿数成反比。

搬把卷片机构中的传动轮 3 与传动轮 4、传动轮 4 与传动轮 5, 它们的转数与齿数必须满足 (4-42) 式的关系。当搬把转动一定角度时, 通过齿轮传动, 刚好使八牙轮转动一周 (六

牙轮转动 $\frac{4}{3}$ 周), 完成输片一张。搬把与转动轴有单向机构连接, 卷片完了, 搬把又可靠弹簧作用复回原位。

第十八节 放大机的放大原理是什么？

一、放大原理是什么？

由第二章第五节图 2-69 可知：放大是底片上的影像通过放大机的镜头加以扩大，使其在放大纸上结成清晰的影像。物距与像距的相对大小刚好与普通摄影相反，普通摄影时，物距（ S ）远远大于焦距（ f ）即 $S \gg f$ ，像就成在镜头像方焦点附近，即像距 S' 近似等于焦距（ $S' \approx f'$ ）；放大时，则是底片放在放大镜头物方焦点稍远处即 $S \approx f$ ，而像距比镜头焦距大得多即 $S' \gg f'$ 。

放大机的成像原理与摄影镜头的成像原理是相同的，都是正光组成实像，只是横向放大率大小不同。因此，放大成像时的物距、像距、焦距三者关系也遵循高斯公式。表 4-11 所示为不同焦距和不同放大倍率情况下，从底片到放大纸面的距离（mm）。

表 4-11 放大率表

| 放大倍率 | 镜头焦距(mm) | | | | |
|------|----------|-------|-------|-------|--------|
| | 50 | 75 | 105 | 135 | 210 |
| 1 | 200 | 300 | 420 | 540 | 840 |
| 1.5 | 208 | 312 | 437 | 562 | 875 |
| 2 | 225 | 337.5 | 472.5 | 607.5 | 945 |
| 2.5 | 245 | 367.5 | 514.5 | 661.5 | 1029 |
| 3 | 266.6 | 400 | 560 | 720 | 1120 |
| 4 | 312.5 | 468.8 | 656.3 | 843.7 | 1312.5 |
| 5 | 360 | 540 | 756 | 972 | 1512 |
| 7 | 457 | 685.6 | 960 | 1234 | 1920 |
| 10 | 605 | 907.5 | 1271 | 1634 | 2541 |

二、人工光源式放大机有几种？

常见的人工光源式放大机可按照照明系统的不同分为聚光式放大机、散光式放大机、半聚光式放大机、反射式放大机等。

1. 聚光式放大机有什么特点？

图 4-98 所示为聚光式放大机光学结构图。由于光源与底片之间用聚光镜组聚光，光能损失少亮度高，放出的照片画面清晰，但温度高，底片距聚光镜组（聚光器）很近，底片在片夹内时间稍长容易损坏，反差强，底片上的颗粒、斑痕容易暴露出来。比较图 4-98 与图 2-69 可知，两者的光学结构是相同的，这种结构是投影仪器（电影机、幻灯机、绘图用的投影仪、印相放大机等）的基本结构。这种放大成像系统，像面（放大纸或幕）的光照度随镜头放大率的增大而减小。因此，要用照明系统提供更多的光能量才能使放大纸得到足够照度的图像。

放大机主要包括两部分：由物镜、底片、放大纸组成的成像部分；由强光源与聚光镜组构成的聚光部分（照明系统）。聚光器的作用有二方面。一方面在未加底片前，能使放大纸获得强烈而均匀的照度，

不出现光源本身结构（如灯丝等）的像；当加入底片后，能使放大纸上形成清晰的像。另一方面可增强放大纸上的照度。聚光部分提供的光的能力跟光源本身的发光强度、光源的大小、聚光镜组的孔径角等因素有关。当发光强度一定时，光源面积越大，聚光镜的孔径越大，聚光器提供的光能量越多。照明系统所提供的光能量能否全部进入成像系统取决于两者的成像关系。因此，必须恰当地安排物镜、聚光器和物体的相互位置。为了使从光源发出的光通过聚光器的光束能够全部到达像面，常采用所谓成中间像的方法来实现。光源通过聚光镜组的光束成一中间像，在底片较小时，令中间像位于底片附近；当底片较大时令中间像位于放大镜头附近。下面以图 4-99 为例来分析光源的光束通过聚光镜组如何均匀分布于放大纸上。

图中 SS_1 为强光源的两个端点（其灯丝密集于一个平面内）； L_1 与 L_2 为聚光镜组； S_1S_2 为光源通过聚光器成的中间像； L 为放大机镜头； PP_1 为底片（置于镜头物方焦点稍远处，即 L_2 附近）； P_1P_2 为放大纸。图表明从光源上一些点所发出的光束经聚光镜组后成像于 S_1S_2 。这些光束都经过底片上的某一面元 AB ，因为它们是从光源上不同点发出的，同时经过同一面元 AB ，故能均匀照明它，但不能形成光源的像。对放大机镜头而言 AB 是物，而这些光束经物镜会聚于放大纸上的面元 A_1B_1 就是 AB 的像。可以设想将底片分割成许许多多的小面元，它们在放大纸上都对应对应的像。这些像的整体便是底片在放大纸上的完整的像，另一方面放大纸被均匀照明。从光源上任一点发出的光束，凡通过聚光镜组的都能通过 AB ，通过 AB 的光束比不用聚光器时要强得多。用了聚光器可以保证凡能通过 AB 的光束，最后都能到 A_1B_1 。聚光器的孔径至少必须等于底片的对角线，光源的大小以能够使它完全充满 L 的整个面积为限，过大会浪费光的能量，过小则不能充分利用物镜。光源后面如果放有反射镜，便可增加通过聚光器的光通量，增加光源发光强度的均匀性。通常将底片放在聚光组前面靠近 L_2 的地方，而光源则置于聚光器后二倍于聚光镜组焦距之处。聚光器焦距等于物镜焦距的一半，这样从光源发出的光束，在通过聚光镜组前后是对称的，而在物镜平面上光源的像与光源本身的大小相等。

2. 散光式放大机有什么特点？

图 4-100 所示为散光式放大机光学结构图。可见这种放大机的光源与底片之间没有聚光镜，因此，它的光能利用率与清晰度都不如集光式放大机的高。光源用乳白灯泡，底片与光源之间装有起散射作用的乳白玻璃（或磨砂玻璃），所以底片的照明光线比较柔和，适于人像照片的放大，通常磨砂玻璃是固定的，不需调节，故使用方便。

3. 半聚光式放大机有什么特点？

图 4-101 所示为半聚光式放大机的光学结构图。这种放大机的光源前面不仅装有聚光用的聚光器，也装有起散射作用的乳白玻璃或磨砂玻璃，所以它的性能特点介于聚光式与散光式之间；光能损失中等，反差中度，光线比较柔和。

4. 反射式放大机有什么特点？

图 4-102 所示为反射式放大机光学结构图。在光源和聚光镜组之间

加入一平面反射镜，反射镜镀冷光膜，吸收红外辐射，可改善底片的受热状况。

三、放大机的主要构造有几部分？

放大机种类很多，大小、形状与性能各异。大型的固定安置在暗室内，调焦支架高达数米；小型的放在工作台上操作，可随意移动；还有小巧轻便的手提放大机等，但其基本结构都由下列几部分组成。

1. 照明系统（光室）

在放大机上部，由光源、反光罩、聚光镜或毛玻璃等组成，用于照明底片，常用的光源有乳白灯泡、磨砂灯泡或高效的卤钨灯。

2. 底片夹

木制或金属制的框子，底片放在框上；也有的在框中间放二层透明的玻璃，底片夹在中间。

3. 暗箱

通常是采用可伸缩的皮腔或金属筒，它连接镜头与聚光镜，可以自由伸缩，便于放大对光。

4. 放大镜头

放大镜头是放大机最主要的组成部分，对它的要求与摄影镜头一样，要求像差校正良好，获得清晰影像，但摄影镜头是将远距离被摄体的影像清晰地表现出来，而放大镜头则是把近距离底片的影像清晰地放大出来。放大镜头的焦距长短应该与底片的尺寸配合，放大镜头焦距的长度应和底片对角线长度大致相同，即底片尺寸大时，要用长焦放大镜头，底片小时则应换用短焦放大镜头。如表 4-12 所示。

表 4 - 12（单位 cm）

| 底片尺寸 | 9 × 12 | 8 × 10.5 | 6 × 9 | 6 | 4.5 × 6 | 2.4 × 3.6 |
|-------|--------|----------|-------|-----|---------|-----------|
| 对角线长度 | 15 | 13 | 10.5 | 8.4 | 7.5 | 4.3 |
| 镜头焦距 | 15 | 13.5 | 10.5 | 8 | 7.5 | 5 |

5. 压纸板

压纸板是用来压放大纸的，并用活动相框来调节相幅的大小。

6. 支架

它是支持放大机机身的，并可上下移动，来调节物和像的比例，调好后将机身固定在所需要的高度。

7. 底座

它用搁放压纸板用的，底座上装有固定支架用的立柱。

四、放大机的基本操作方法如何？

放大机通常的操作程序如下：

1. 安装底片

将底片拂拭清洁后放入片夹内，底片边缘用黑纸框遮挡，然后装入放大机中，膜面朝下，面向镜头。

2. 调节机身

先将放大压板的框子移到需要的尺度上，框内铺进一张白纸；开启放大机光源，底片影像就投在白纸上，升降放大机机身，便可看到白纸上影像大小发生变化。

3. 调焦

通过步骤 2 在白纸上可以得到大小合适的影像，但不一定清晰，必须在小范围内调节镜头和底片间的距离，直到投影在放大压板上影像清晰为止，这就是调焦过程。

4. 调整光圈

为了便于调焦程度的观察，通常是在调焦时尽量开大镜头的光圈，调焦完毕，必须将光圈收缩到所需要的级数。

5. 曝光

在选择曝光时间长短时，必须考虑下面五个因素：

- 光源强度；
- 底片密度；
- 放大倍率的大小；
- 放大纸的感光速度；
- 光圈的大小等。

通常是用实验的方法来确定正确的曝光时间，可用分段曝光法，也可用局部遮挡法，在一条实验放大纸上分段进行不同时间的曝光，显影后按照试验纸上不同曝光效果来选择确定采用最佳曝光时间。

